

TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

UNIDAD DE POSGRADOS DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA EN
CONSTRUCCIÓN

**Evaluación del comportamiento de la pintura plástico en frío en
proyectos de demarcación vial.**

CC BY-NC-ND 4.0

**Atribución-NoComercial-SinDerivadas
4.0 Internacional**

PROYECTO PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO / PROFESIONAL DE
MAESTRÍA EN INGENIERÍA VIAL

PRESENTA

ING. HELEN HIDALGO DELGADO

Tutor: Ing. Sergio Fernández Cerdas MSc.

Cartago, agosto de 2025

Declaración de Derechos de Autor

De acuerdo con la ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, el autor conserva el derecho moral y patrimonial sobre la obra, no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones, reproducciones u obras derivadas de la misma. Para cualquier adaptación, comunicación al público o modificación de la obra, se deberá contar con autorización expresa y por escrito del autor.

Declaración de uso de herramientas de inteligencia artificial (incluir en caso necesario)

Declaro que utilicé herramientas de inteligencia artificial para la elaboración del presente trabajo final de graduación. Las herramientas utilizadas fueron: Chatpgt y Gemini y se emplearon en el desempeño de las siguientes secciones:

- Redacción de textos a partir de ideas brindadas por el usuario
- Revisión de literatura.

INDICE GENERAL

Resumen	10
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN	12
1.1 Antecedentes	12
1.2 Planteamiento del problema	13
1.3 Justificación del estudio	14
1.4 Objetivo	15
1.4.1 Objetivo General	15
1.4.2 Objetivos específicos	15
1.5 Alcances y limitaciones	15
1.5.1 Alcances	15
1.5.2 Limitaciones	15
1.6 Hipótesis	16
2 CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	17
2.1.1 Descripción de la pintura plástico en frío	17
2.1.2 Pintura plástico en frío en Costa Rica	23
2.1.3 Sistema de demarcación Vial	24
2.1.4 Normativa en Costa Rica para pinturas y materiales de demarcación vial.	24
2.1.5 Normativas internacionales para la aplicación de plástico en frío	25
2.1.6 Impacto ambiental de materiales y trabajos de demarcación vial	34
2.1.7 Compatibilidad entre materiales para redemarcación vial horizontal.	34
2.1.8 Retroreflectividad	36
2.1.9 Inspección y análisis visual de demarcaciones viales	40
2.1.10 Resistencia al deslizamiento en demarcaciones viales horizontales	42
2.1.11 Paño de prueba	44
2.1.12 Análisis estadístico de la variabilidad de la desviación mediante ANOVA	44
3 CAPÍTULO 3: MARCO METODOLOGICO	48
3.1 Fase 1. Investigación Teórica	49
3.1.1 Fuentes de Información	50
3.2 Fase 2 Experimental	51
3.2.1 Investigación de instituciones y empresas colaboradoras	51
3.2.2 Determinación de variables a medir en los paños de prueba	51
3.2.3 Selección de los tramos para prueba	52
3.2.4 Estudio de precios de demarcación vial para la pintura solvente, plástico en frío y material termoplástico en Costa Rica	53

3.2.5	Aspectos ambientales en los que la pintura plástica en frío podría inferir en el medio ambiente.....	53
3.3	Fase 3 Realización de demarcación en paños de prueba	53
3.3.1	Demarcación	53
3.3.2	Medición de las variables seleccionadas en la Fase 2 para cada uno de los paños de prueba	59
3.3.3	Levantamiento de cambios generados por condiciones de exposición de la demarcación vial (inspección visual).....	62
3.4	Fase 4 Análisis de datos	62
3.4.1	Análisis de las variables seleccionadas en la Fase 2 para cada uno de los paños de prueba	62
3.4.2	Análisis de viabilidad económica de la demarcación con pintura plástico en frío contra las otras alternativas usadas en el país.	64
3.4.3	Análisis de aspectos ambientales en los que la pintura plástico en frío podría inferir en el medio ambiente.....	64
4	CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANALISIS	65
4.1	Paños de prueba.....	65
4.2	Evaluación de la condición de los paños de prueba previo a la realización de las demarcaciones.....	66
4.2.1	Tramo A San Francisco.....	66
4.2.2	Tramo B Barrio El Socorro	67
4.2.3	Tramo C María Auxiliadora	67
4.2.4	Tramo D María Auxiliadora Arriba / Abajo.....	68
4.3	Ensayos de Evaluación	69
4.4	Caracterización de la pintura y materiales empleados en la demarcación.....	77
4.5	Condiciones de exposición de la demarcación vial	80
4.5.1	Tránsito	80
4.5.2	Clima	81
4.6	Retroreflectividad	81
4.7	Adherencia y desgaste de la demarcación vial horizontal	107
4.8	Resistencia al deslizamiento o fricción de la demarcación vial horizontal.....	110
4.9	Estudio de viabilidad económica de la demarcación con pintura plástico en frío y comparación de precios con pintura base solvente y material termoplástico en Costa Rica.....	114
4.10	Aspectos ambientales asociados al uso de pintura plástica en frío.....	119
4.10.1	Retroreflectividad	127
4.10.2	Adherencia y desgaste de las demarcaciones.....	131
4.10.3	Resistencia al deslizamiento en demarcaciones viales horizontales	132
4.10.4	Aspectos ambientales en los que la pintura plástico en frío podría inferir en el medio ambiente.	133

4.10.1	Análisis de la viabilidad económica de la demarcación vial con pintura plástico en frío y comparativa de precios con pintura base solvente y material termoplástico	135
5	CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	138
5.1	Conclusiones	138
5.2	Recomendaciones	138
6	CAPÍTULO 6: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	140
7	CAPÍTULO 7: APÉNDICES	143
7.1	APÉNDICE A: Porcentaje de área con demarcación adherida a la superficie	143
7.2	APÉNDICE B: Evaluación visual de la demarcación vial	161
7.3	APÉNDICE C: Medición de la resistencia al deslizamiento con péndulo británico	164
7.4	APÉNDICE D: Mapa de vista general de la ubicación de todos los tramos de prueba	167
7.5	APÉNDICE E: Paño de prueba A Barrio San Francisco	168
7.6	APÉNDICE F: Paño de prueba de B Barrio El Socorro	169
7.7	APÉNDICE G. Paño de prueba C, María Auxiliadora	170
7.8	APÉNDICE H: Paño de prueba D, María Auxiliadora Arriba-Abajo	171
7.9	APÉNDICE I: Calculo de ANOVA para retroreflectividad	172
7.10	APÉNDICE J: Calculo de ANOVA para desprendimiento de demarcación	179
7.11	APÉNDICE K: Cálculo de ANOVA para Resistencia al Deslizamiento con Péndulo Británico	180

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1</i> Coordenadas cromáticas para pinturas de demarcación vial	28
Tabla 2 Espesor mínimo de película seca de material de demarcación	31
Tabla 3 Adherencia entre tipo de pintura para redemarcación	32
<i>Tabla 4.</i> Valores mínimos de retroreflectividad	33
<i>Tabla 5</i> Contenido de microesferas por tipo de pintura	39
Tabla 6 Rangos de retroreflectividad iniciales.	39
<i>Tabla 7</i> Espesores de materiales de demarcación vial normados por la INTE Q46	69
<i>Tabla 8</i> Medición de espesores de materiales de demarcación	70
<i>Tabla 9</i> Análisis de material termoplástico color blanco	74
<i>Tabla 10</i> Análisis de material termoplástico color amarillo	74
<i>Tabla 11</i> Análisis de pintura base solvente amarilla	74
<i>Tabla 12</i> Análisis de pintura base solvente blanca	75
<i>Tabla 13</i> Normativa aplicada a los ensayos de laboratorio a las pinturas y material termoplástico.	75
<i>Tabla 14</i> Análisis de pintura plástico en frío blanca	76
<i>Tabla 15</i> Análisis de pintura plástico en frío blanca	76
<i>Tabla 16</i> Análisis de pintura plástico en frío blanca	76
<i>Tabla 17</i> Análisis de pintura plástico en frío amarillo	77
<i>Tabla 18</i> Transito diario en cada paño de prueba	80
<i>Tabla 19</i> Resultados de mediciones de retroreflectividad para pintura plástico en frío	82
<i>Tabla 20</i> Resultados de mediciones de retroreflectividad para pintura solvente	83
<i>Tabla 21</i> Resultados de mediciones de retroreflectividad para material termoplástico	84
<i>Tabla 22</i> Resultados de mediciones de retroreflectividad	85
<i>Tabla 23</i> Resultados de mediciones de retroreflectividad	86
<i>Tabla 24</i> Resultados de mediciones de retroreflectividad	87
<i>Tabla 25</i> Resultados de mediciones de retroreflectividad	88
<i>Tabla 26</i> Resultados de mediciones de retroreflectividad	89
<i>Tabla 27</i> Resultados de mediciones de retroreflectividad	90
<i>Tabla 28</i> Resultados de mediciones de retroreflectividad	91
<i>Tabla 29</i> Resultados de mediciones de retroreflectividad	92
<i>Tabla 30</i> Resultados de mediciones de retroreflectividad	92
<i>Tabla 31</i> Análisis estadístico de la variabilidad de la desviación en el paño de Prueba de Barrio El Socorro, Color Blanco, primera medición	94
<i>Tabla 32</i> Análisis estadístico de la variabilidad de la desviación en el paño de Prueba de Barrio El Socorro, Color Amarillo, primera medición	94
<i>Tabla 33</i> Análisis estadístico de la variabilidad de la desviación en el paño de Prueba de Barrio El San Francisco, Color blanco, primera medición	95
<i>Tabla 34</i> Análisis estadístico de la variabilidad de la desviación en el paño de Prueba de Barrio El San Francisco, Color Amarillo, primera medición	95
<i>Tabla 35</i> Análisis estadístico de la variabilidad de la desviación en el paño de Prueba de Barrio María Auxiliadora Color blanco, primera medición	95
<i>Tabla 36</i> Análisis estadístico de la variabilidad de la desviación en el paño de Prueba de Barrio María Auxiliadora Color amarillo, primera medición	96
<i>Tabla 37</i> Análisis estadístico de la variabilidad de la desviación en el paño de Prueba de Barrio María Auxiliadora Arriba-Abajo, color amarillo, primera medición	96
<i>Tabla 38</i> Resumen de valores mínimos de retroreflectividad según normativa	97
Tabla 39 Pérdida de la retroreflectividad Barrio San Francisco	105
Tabla 40 Pérdida de la retroreflectividad Barrio Socorro	105
<i>Tabla 41</i> Pérdida de la retroreflectividad Barrio María Auxiliadora	105
<i>Tabla 42</i> Pérdida de la retroreflectividad Barrio María Auxiliadora Arriba-Abajo	105

<i>Tabla 43 Recuento de Pérdida de la retroreflectividad- Color Blanco</i>	106
<i>Tabla 44 Recuento de Pérdida de la retroreflectividad- Color Amarillo</i>	106
<i>Tabla 45 Porcentaje de adherencia de pintura y material termoplástico a la superficie</i>	107
<i>Tabla 46 Medición de la Resistencia al Deslizamiento con Péndulo Británico</i>	111
<i>Tabla 47 Promedios de valores de BPN para cada tipo de demarcación y para cada color</i>	112
<i>Tabla 48 Precios del estudio de mercado de proceso 2024LD-000059-0025000001</i>	115
<i>Tabla 49 Precios y tipo de material ofertados para la contratación 2024LD-000059-0025000001</i>	115
<i>Tabla 50 Precios y tipo de material ofertados para línea continua-contratación 2024LE-000013-0004611901</i>	116
<i>Tabla 51 Precios ofertados para línea continua-contratación 2024LD-000080-0022200208</i>	117
<i>Tabla 52 Precios ofertados para línea continua-contratación 2024LE-000005-0023200001</i>	118
<i>Tabla 53 Comparativa de precios para líneas continuas</i>	118
<i>Tabla 54 Comparativa de precios para altos horizontales</i>	119
<i>Tabla 55 Variables consideradas en el escenario 1, comparativa de tipos de demarcación vial con espesor delgado.</i>	121
<i>Tabla 56 Variables consideradas en el escenario 2, comparativa de tipos de demarcación con espesor grueso</i>	122
<i>Tabla 57 Comparación de precios para demarcación lineal (línea continua)</i>	135
<i>Tabla 58 Promedio y rangos de precios para cada tipo de demarcación.</i>	136

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Pistola de aplicación y cámara de mezclado de componentes de pintura plástico en frío.	20
Figura 2 Aplicación de pintura plástico en frío con técnica de pulverización	21
Figura 3 Marcaje perfilado con extrusión, pintura plástica en frío	21
Figura 4 Aplicación de pintura plástico en frío por extrusión	22
Figura 5 Demarcación por extrusión de pintura plástico en frío	22
Figura 6 Demarcación de pintura plástico en frío con llaneta	23
Figura 7 Técnica de pulverización	26
Figura 8 Método de colocación de pintura plástico en frío por extrusión de forma manual y mecánica	26
Figura 9 Aplicación por dispersión	27
Figura 10 Aplicación con método de extrusión (alto relieve)	27
Figura 11 Ángulos-geometría de reflexión	36
Figura 12 Profundidad adecuada para la reflexión de la microesfera	37
Figura 13 Microesfera con más del 60% de superficie expuesta sobre la pintura	38
Figura 14 Microesfera con mas del 60% de superficie dentro de la pintura	38
Figura 15 Porcentaje relativo del pavimento cubierto con material de demarcación	42
Figura 16 Péndulo británico, herramienta para medir fricción de superficies	43
Figura 17 Diagrama de proceso de investigación	49
Figura 18 Preparación de la Superficie, limpieza	54
Figura 19 Marcación Previa	54
Figura 20 Equi po de demarcación de pintura base solvente	55
Figura 21 Equipo de demarcación para material termoplástico	55
Figura 22 Equipo de demarcación para pintura plástico en frío	56
Figura 23 Control de tránsito	56
Figura 24 Demarcación de líneas transversales con material termoplástico	57
Figura 25 Demarcación de línea amarilla con pintura base solvente	57
Figura 26 Demarcación de línea borde con pintura plástico en frío	58
Figura 27 Medición de retrorreflectividad el 14 de agosto del 2025, Paños de prueba varios	59
Figura 28 Medición de retrorreflectividad del 27 de agosto del 2024, en paños de prueba varios	60
Figura 29 Medición de retrorreflectividad del 24 de octubre del 2024, en paños de prueba varios	60
Figura 30 Medición de retrorreflectividad del 24 de febrero del 2025, en paños de prueba varios	61
Figura 31 Líneas transversales de diferente tipo de material de color blanco	66
Figura 32 Paño de prueba A, Barrio San Francisco	67
Figura 33 Paño de prueba B, Barrio El Socorro	67
Figura 34 Paño de prueba C, Barrio María Auxiliadora	68
Figura 35 Paño de prueba D, Barrio María Auxiliadora Arriba	68
Figura 36 Paño de prueba D, Barrio María Auxiliadora Abajo	68
Figura 37 Medición de espesor de material termoplástico el 31 de julio, 2024 Barrio San Francisco	70
Figura 38 Medición de espesor de material termoplástico el 01 de agosto, 2024 Barrio María Auxiliadora.	70
Figura 39 Medición de espesor de pintura base solvente el 03 de agosto, 2024 Barrio María Auxiliadora.	71
Figura 40 Medición de espesor de pintura plástico en frío el 12 de agosto, 2024 Barrio María Auxiliadora.	71
Figura 41 Medición de espesor de pintura plástico en frío el 13 de agosto, 2024 Barrio María Auxiliadora.	72
Figura 42 Medición de humedad previo demarcaciones.	72
Figura 43 Muestro de material termoplástico amarillo	73
Figura 44 Muestreo de componentes de pintura plástico en frío	73
Figura 45 Desempeño Retrorreflectivo, barrio San Francisco, color blanco	98
Figura 46 Promedio de desempeño Retrorreflectivo, barrio San Francisco, color blanco	98
Figura 47 Desempeño Retrorreflectivo barrio San Francisco, color amarillo	99
Figura 48 Promedio de desempeño Retrorreflectivo barrio San Francisco, color amarillo	99
Figura 49 Desempeño Retrorreflectivo, barrio El Socorro, color blanco.	100
Figura 50 Promedio de desempeño retrorreflectivo, barrio El Socorro, color blanco	100

<i>Figura 51 Desempeño Retrorreflectivo, barrio El Socorro, color amarillo</i>	101
<i>Figura 52 Promedio de desempeño retrorreflectivo, barrio El Socorro, color amarillo</i>	101
<i>Figura 53 Desempeño Retrorreflectivo, barrio María Auxiliadora, color blanco.</i>	102
Figura 54 Promedio de desempeño Retrorreflectivo, barrio María Auxiliadora, color blanco.	102
<i>Figura 55 Desempeño Retrorreflectivo, barrio María Auxiliadora, color amarillo.</i>	103
<i>Figura 56 Promedio desempeño Retrorreflectivo, barrio María Auxiliadora, color amarillo</i>	103
<i>Figura 57 Desempeño Retrorreflectivo, barrio María Auxiliadora Arriba y Abajo, color amarillo.</i>	104
Figura 58 Promedio de desempeño Retrorreflectivo, barrio María Auxiliadora Arriba y Abajo, color amarillo	104
<i>Figura 59 Resultados de medición de retrorreflectividad en el Cantón de Vázquez de Coronado (NO es un paño de prueba).</i>	107
<i>Figura 60 Resistencia al deslizamiento de diferentes tipos de material de demarcación vial</i>	114
<i>Figura 61 Impactos ambientales relativos de las marcaciones de capa fina de plástico pulverizado en frío tipo II, pinturas termoplásticas pulverizables, pinturas a base de solventes y pinturas a base de agua.</i>	124
<i>Figura 62 Impactos ambientales relativos generados por demarcación estructural con pintura plástico en frío, plástico frío renovado tres veces con 0,3 mm de espesor de esa misma pintura y material termoplástico.</i>	125
<i>Figura 63 Desprendimiento de pintura plástico en frío, el día 6/10/2024</i>	143
<i>Figura 64 Desprendimiento de pintura plástico en frío, el día 15/03/2025</i>	143
<i>Figura 65 Desprendimiento de pintura solvente, el día 6/10/2024</i>	143
<i>Figura 66 Desprendimiento de pintura solvente, el día 15/03/2025</i>	143
<i>Figura 67 Desprendimiento de material termoplástico, el día 6/10/2024</i>	144
<i>Figura 68 Desprendimiento de material termoplástico, el día 15/03/2025</i>	144
<i>Figura 69 Desprendimiento de plástico en frío, el día 6/10/2024</i>	144
<i>Figura 70 Desprendimiento de plástico en frío, el día 15/03/2025</i>	144
<i>Figura 71 Desprendimiento de pintura solvente, el día 6/10/2024</i>	145
<i>Figura 72 Desprendimiento de pintura solvente, el día 15/03/2025</i>	145
<i>Figura 73 Desprendimiento material termoplástico, el día 6/10/2024</i>	145
<i>Figura 74 Desprendimiento de material termoplástico, el día 15/03/2025</i>	145
<i>Figura 75 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 6/10/2024</i>	146
<i>Figura 76 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 15/03/2025</i>	146
<i>Figura 77 Desprendimiento de pintura solvente, el día 6/10/2024</i>	146
<i>Figura 78 Desprendimiento de pintura solvente, el día 15/03/2025</i>	146
<i>Figura 79 Desprendimiento material termoplástico, el día 6/10/2024</i>	147
<i>Figura 80 Desprendimiento de material termoplástico, el día 15/03/2025</i>	147
<i>Figura 81 líneas transversales Barrio Socorro</i>	147
<i>Figura 82 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 6/10/2024</i>	148
<i>Figura 83 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 15/03/2025</i>	148
<i>Figura 84 Desprendimiento de pintura solvente, el día 6/10/2024</i>	148
<i>Figura 85 Desprendimiento de pintura solvente, el día 15/03/2025</i>	148
<i>Figura 86 Desprendimiento material termoplástico, el día 6/10/2024</i>	149
<i>Figura 87 Desprendimiento de material termoplástico, el día 15/03/2025</i>	149
<i>Figura 88 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 6/10/2024</i>	149
<i>Figura 89 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 15/03/2025</i>	149
<i>Figura 90 Desprendimiento de pintura solvente, el día 6/10/2024</i>	150
<i>Figura 91 Desprendimiento de pintura solvente, el día 15/03/2025</i>	150
<i>Figura 92 Desprendimiento material termoplástico, el día 6/10/2024</i>	150
<i>Figura 93 Desprendimiento de material termoplástico, el día 15/03/2025</i>	150
<i>Figura 94 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 6/10/2024</i>	151
<i>Figura 95 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 15/03/2025</i>	151
<i>Figura 96 Desprendimiento de pintura solvente, el día 6/10/2024</i>	151
<i>Figura 97 Desprendimiento de pintura solvente, el día 15/03/2025</i>	151
<i>Figura 98 Desprendimiento material termoplástico, el día 6/10/2024</i>	152

<i>Figura 99 Desprendimiento de material termoplástico, el día 15/03/2025</i>	152
<i>Figura 100 Líneas transversales Barrio María Auxiliadora</i>	152
<i>Figura 101 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 6/10/2024</i>	153
<i>Figura 102 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 15/03/2025</i>	153
<i>Figura 103 Desprendimiento de pintura solvente, el día 6/10/2024</i>	153
<i>Figura 104 Desprendimiento de pintura solvente, el día 15/03/2025</i>	153
<i>Figura 105 Desprendimiento material termoplástico, el día 6/10/2024</i>	154
<i>Figura 106 Desprendimiento de material termoplástico, el día 15/03/2025</i>	154
<i>Figura 107 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 6/10/2024</i>	154
<i>Figura 108 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 15/03/2025</i>	154
<i>Figura 109 Desprendimiento de pintura solvente, el día 6/10/2024</i>	155
<i>Figura 110 Desprendimiento de pintura solvente, el día 15/03/2025</i>	155
<i>Figura 111 Desprendimiento material termoplástico, el día 6/10/2024</i>	155
<i>Figura 112 Desprendimiento de material termoplástico, el día 15/03/2025</i>	155
<i>Figura 113 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 6/10/2024</i>	156
<i>Figura 114 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 15/03/2025</i>	156
<i>Figura 115 Desprendimiento de pintura solvente, el día 6/10/2024</i>	156
<i>Figura 116 Desprendimiento de pintura solvente, el día 15/03/2025</i>	157
<i>Figura 117 Desprendimiento material termoplástico, el día 6/10/2024</i>	157
<i>Figura 118 Desprendimiento de material termoplástico, el día 15/03/2025</i>	157
<i>Figura 119 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 6/10/2024</i>	157
<i>Figura 120 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 15/03/2025</i>	157
<i>Figura 121 Desprendimiento de pintura solvente, el día 6/10/2024</i>	158
<i>Figura 122 Desprendimiento de pintura solvente, el día 15/03/2025</i>	158
<i>Figura 123 Desprendimiento material termoplástico, el día 6/10/2024</i>	158
<i>Figura 124 Desprendimiento de material termoplástico, el día 15/03/2025</i>	158
<i>Figura 125 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 6/10/2024</i>	159
<i>Figura 126 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 15/03/2025</i>	159
<i>Figura 127 Desprendimiento de pintura solvente, el día 6/10/2024</i>	159
<i>Figura 128 Desprendimiento de pintura solvente, el día 15/03/2025</i>	159
<i>Figura 129 Desprendimiento material termoplástico, el día 6/10/2024</i>	160
<i>Figura 130 Desprendimiento de material termoplástico, el día 15/03/2025</i>	160
<i>Figura 131 Pintura plástico en frío adaptada a la irregularidad de la calzada</i>	161
<i>Figura 132 Pintura plástico en frío adaptada a las fisuras de la calzada</i>	161
<i>Figura 133 Pintura base solvente adaptada a las fisuras de la calzada.</i>	162
<i>Figura 134 Material termoplástico fracturado en puntos donde hay fisuras en la calzada</i>	162
<i>Figura 135 Material termoplástico desprendido en puntos donde hay fisuras en la calzada</i>	163
<i>Figura 136 Material termoplástico desprendido en puntos donde quedo vacío.</i>	163
<i>Figura 137 Medición de la resistencia al deslizamiento con péndulo británico</i>	164
<i>Figura 138 Medición de la resistencia al deslizamiento con péndulo británico, Barrio El Socorro. Plástico en Frio</i>	164
<i>Figura 139 Medición de la resistencia al deslizamiento con péndulo británico. Barrio El Socorro Plástico en Frio</i>	165
<i>Figura 140 Medición de la resistencia al deslizamiento con péndulo británico. Barrio San Francisco Plástico en Frio</i>	165
Figura 141 Medición de la resistencia al deslizamiento con péndulo británico .Barrio San Francisco Material Termoplástico	166
Figura 142 Medición de la resistencia al deslizamiento con péndulo británico. Barrio María Auxiliadora. Material Termoplástico	166

Resumen

La investigación desarrollada tuvo como objetivo principal evaluar el comportamiento técnico, económico y ambiental de la pintura plástica en frío como alternativa para la demarcación vial horizontal en Costa Rica, comparándola con los sistemas tradicionalmente utilizados: pintura base solvente y material termoplástico. Esta evaluación se fundamentó en pruebas de campo, mediciones de retrorreflectividad, análisis de adherencia y desgaste, resistencia al deslizamiento, costos unitarios y huella ambiental.

Los resultados reflejan que la pintura plástica en frío presenta un desempeño intermedio o superior frente a las demás alternativas. En cuanto a retrorreflectividad, mostró una excelente conservación de microesferas reflectivas, especialmente en líneas blancas, con pérdidas mínimas de visibilidad nocturna incluso después de varios meses de exposición. Aunque sus valores iniciales fueron en algunos casos inferiores a los del material termoplástico, logró mantener una estabilidad luminosa superior en el tiempo, especialmente si se aplican buenas prácticas y se emplean microesferas tipo II. En líneas amarillas, si bien los valores fueron más variables, en general se mantuvieron dentro de parámetros aceptables y sin caídas abruptas.

En cuanto a adherencia, la pintura plástica en frío se adaptó mejor a superficies irregulares o deterioradas. Su naturaleza fluida durante la aplicación le permite introducirse en fisuras y deformaciones, favoreciendo un anclaje efectivo y reduciendo el riesgo de desprendimiento. En contraste, el material termoplástico mostró fracturas y desplazamientos en pavimentos con cuero de lagarto, mientras que la pintura solvente presentó los mayores niveles de desprendimiento, incluso en condiciones óptimas.

Respecto a la resistencia al deslizamiento, todos los materiales evaluados mostraron valores similares (entre 27 y 29 BPN), aunque ninguno alcanzó los estándares internacionales recomendados. No obstante, la pintura plástica en frío no evidenció un comportamiento inferior, lo que resulta favorable considerando su reciente introducción en el país.

Desde la perspectiva económica, la pintura plástica en frío presenta un costo intermedio entre las otras dos alternativas. Es más cara que la pintura solvente, pero significativamente más accesible que el termoplástico. Este equilibrio la hace viable para proyectos que requieren durabilidad sin incurrir en altos costos iniciales. Aunque su aplicación requiere personal capacitado y equipos bicomponentes, no exige fundición ni maquinaria compleja, lo que reduce riesgos operativos y costos logísticos.

Finalmente, el análisis de impacto ambiental identificó que la pintura plástica en frío es la opción más sostenible entre los materiales evaluados. Emite menos compuestos orgánicos volátiles (COV) que la pintura solvente, no requiere procesos térmicos intensivos como el termoplástico y presenta la menor huella ambiental acumulada en la mayoría de los indicadores evaluados.

En conjunto, los hallazgos posicionan a la pintura plástica en frío como una solución técnica eficiente, ambientalmente responsable y económicamente competitiva. Su implementación progresiva podría contribuir significativamente al mejoramiento de la seguridad vial, la sostenibilidad y la eficiencia en los procesos de demarcación vial horizontal en Costa Rica.

Palabras clave: pintura, plástico, frío, demarcación, retrorreflectividad, adherencia, desgaste, resistencia, deslizamiento, ambiente.

Abstract

The main objective of this research was to evaluate the technical, economic, and environmental performance of cold plastic paint as an alternative for horizontal road marking in Costa Rica, comparing it with traditionally used systems: solvent-based paint and thermoplastic material. This evaluation was based on field testing, retroreflectivity measurements, adhesion and wear analysis, skid resistance testing, unit cost assessments, and environmental footprint analysis.

The results show that cold plastic paint exhibits intermediate or superior performance compared to the other alternatives. In terms of retroreflectivity, it demonstrated excellent retention of reflective beads—particularly on white lines—with minimal loss of nighttime visibility even after several months of exposure. While its initial values were in some cases lower than those of thermoplastic markings, cold plastic paint maintained higher luminance stability over time, especially when best practices were followed and type II beads were used. Yellow lines showed more variable results, but generally remained within acceptable parameters without abrupt reductions.

Regarding adhesion, cold plastic paint adapted better to irregular or deteriorated pavement surfaces. Its fluid nature during application allows it to penetrate cracks and surface deformations, promoting effective anchorage and reducing the risk of delamination. In contrast, thermoplastic material exhibited fractures and displacement on pavements with alligator cracking, while solvent-based paint showed the highest levels of detachment, even under optimal conditions.

In terms of skid resistance, all materials tested presented similar values (between 27 and 29 BPN), although none met international recommended standards. Nevertheless, cold plastic paint did not show inferior behavior, which is favorable considering its recent introduction in the country.

From an economic perspective, cold plastic paint has a unit cost between the other two materials. It is more expensive than solvent-based paint but significantly more affordable than thermoplastic. This balance makes it a viable option for projects requiring durability without incurring high initial costs. Although its application demands trained personnel and two-component equipment, it does not require melting or complex machinery, reducing operational risks and logistical expenses.

Finally, the environmental impact analysis identified cold plastic paint as the most sustainable option among the materials evaluated. It emits fewer volatile organic compounds (VOCs) than solvent-based paint, does not require energy-intensive thermal processes like thermoplastic, and presents the lowest overall environmental footprint across most of the indicators assessed.

Overall, the findings position cold plastic paint as a technically efficient, environmentally responsible, and economically competitive solution. Its progressive implementation could significantly contribute to improving road safety, sustainability, and efficiency in horizontal road marking processes in Costa Rica.

Keywords: road paint, plastic, cold, demarcation, retroreflectivity, adhesion, wear, resistance, slip, environment.

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Antecedentes

Costa Rica, es un país tropical que cuenta con un eje montañoso que atraviesa todo el territorio costarricense y esta condición genera que el relieve no sea constante que este interrumpido por depresiones o alteraciones en el suelo. Debido a esta condición las rutas del país son sinuosas y con visibilidad reducida, ambos factores ponen en riesgo a los usuarios de las carreteras. Por esta razón y por la naturalidad de los proyectos viales es importante mejorar y mantener las vías en condiciones óptimas. Respecto al tema de investigación, la demarcación vial es uno de los elementos que mejores resultados puede generar respecto a seguridad en la conducción.

La demarcación vial juega un papel crucial en la reducción de la peligrosidad en las carreteras, permitiendo a los conductores identificar el carril contrario, los carriles en una misma dirección, las curvas pronunciadas, los finales de carriles de ascenso, las señales de giro y las zonas de estacionamiento prohibido. Esta visibilidad permite que los conductores reaccionen adecuadamente y mantener una circulación segura. Además, una adecuada demarcación contribuye significativamente a la comodidad del conductor.

Se deduce de lo anterior que es imperativo que las marcas viales sean visibles. Para lograr esto, es necesario utilizar pinturas con alto rendimiento y calidad. A mayor durabilidad y calidad de la pintura, mejor será el servicio proporcionado a los usuarios de la vía. Paralelamente a lograr vías con demarcaciones adecuadas, está la implementación de equipos, personal calificado y muy importante un material con resistencia al desgaste, desempeño de retroreflectividad, adaptabilidad, resiliente y de bajo o nulo impacto ambiental. Atendiendo este aspecto se crea una nueva pintura llamada plástico en frío.

En América, países como Brasil, México, Peru y Colombia han implementado la demarcación vial con pintura plástica en frío. Como resultado, se han desarrollado normativas específicas para asegurar una aplicación y aceptación adecuadas de esta técnica. En Colombia, la normativa es la "Pinturas para Demarcación de Pavimentos: Especificaciones," elaborada por ICONTEC Internacional. En Brasil, la normativa es "Señalización Vial Horizontal: Plástico en Frío a Base de Resinas Metacrílicas Reactivas - Suministro y Aplicación," desarrollada por la Asociación Brasileña de Normas Técnicas (Zona de Pinturas, 2013).

En Costa Rica, los proyectos de demarcación en rutas nacionales y cantonales están sujetos a estrictos controles de calidad, los cuales se aplican principalmente a sistemas tradicionales como la pintura base solvente y el material termoplástico. No obstante, la pintura plástica en frío, al tratarse de una tecnología emergente en el país, aún no ha sido incorporada de manera formal en los protocolos de evaluación establecidos. Además, la disponibilidad de bibliografía técnica nacional relacionada con su desempeño y aplicación es limitada, lo que evidencia la necesidad de generar estudios que respalden su validación e inclusión en la normativa vigente

El Boletín Técnico de Desempeño de la Demarcación Vial Horizontal en Costa Rica, publicado en 2014 y el boletín "Desempeño de la Demarcación Vial Horizontal Bajo Carga Dinámica en Laboratorio a partir del Parámetro de Retroreflectividad, 2019" ambos publicados por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales/PITRA, analiza las pinturas termoplásticas, a base de agua y a base de solvente, pero no incluye la pintura plástica en frío. Este documento, así como otros similares, no consideran ni incluyen pruebas sobre esta tecnología, lo que puede explicarse por la novedad del material en el campo de la demarcación vial. . (Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales/PITRA, 2014)

La pintura plástica en frío tiene origen en Europa, desde donde se ha proyectado a otros continentes y países como China, México, Perú, Colombia, Brasil. En 2013, el portal web Zona de Pinturas publicó una noticia titulada "Desarrollan Pinturas de Plástico en Frío para Demarcación Vial," en la que se informa que la empresa Pintuco introduciría esta nueva tecnología a los contratistas de trabajos viales en Colombia. La publicación destaca que la pintura plástica en frío ofrece un proceso de aplicación más eficiente, incrementa la seguridad, contiene microesferas para mejorar la retroreflectividad, tiene propiedades antideslizantes y es más duradera en comparación con otras técnicas de demarcación (Zona de Pinturas, 2013)

1.2 Planteamiento del problema

Según un informe del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) de Costa Rica, durante el primer trimestre de 2024 se reportaron 117 muertes en las carreteras del país. Este dato subraya el estado crítico de las carreteras y la seguridad de los usuarios. En consecuencia, es imperativo mantener las calles en condiciones óptimas tanto en términos de confort como de seguridad. Desde la perspectiva de la demarcación vial, esta es una variable fundamental para asegurar el uso adecuado de las vías y proporcionar tiempos de reacción adecuados para los conductores (Ministerio de Obras Públicas y Transporte, 2024)

En Costa Rica, la vida útil de la pintura solvente y material termoplástico aproxima los 6 a 9 meses. Durante este período, la capacidad de retroreflectividad de las marcas puede disminuir significativamente. La pérdida de retroreflectividad puede reducir la visibilidad de las líneas de la carretera durante la noche, lo que aumenta el riesgo para la integridad de los usuarios (LanammeUCR, 2014)

Este limitado período de vida útil impone una alta demanda en los departamentos de mantenimiento de carreteras, que deben monitorear y repasar las demarcaciones con frecuencia para garantizar que mantengan las condiciones de retroreflectividad adecuadas. Debido a la corta duración de la eficacia de las marcas, la inversión económica necesaria para el mantenimiento es considerable, ya que es necesario repintar las mismas áreas aproximadamente dos veces al año.

Además, la adopción de nuevas tecnologías en la construcción vial en Costa Rica se enfrenta a un obstáculo significativo debido a la falta de documentación que respalde las buenas prácticas constructivas y los parámetros adecuados para la aplicación de nuevos productos. Esta situación es particularmente evidente en el caso de la pintura plástica en frío. Aunque este material cuenta con normativa y estudios en países como Colombia y Brasil, en Costa Rica aún no se han llevado a cabo investigaciones sobre su comportamiento, propiedades físicas, rendimiento y parámetros de control. La ausencia de información dificulta la aceptación y adopción de esta técnica de demarcación por parte de algunas administraciones públicas.

Se está en la obligación de actualizar la metodología constructiva en todos los ámbitos de la construcción vial para incorporar técnicas más avanzadas que promuevan el ahorro de materiales, reduzcan la inversión económica, minimicen los riesgos laborales, optimicen el tiempo y disminuyan los desechos y el impacto ambiental. La pintura plástica en frío podría ofrecer mejoras en estos aspectos, pero la escasa investigación local impide parcialmente su aplicación. Por esta razón, se plantea la necesidad de investigar esta tecnología para evaluar su viabilidad.

1.3 Justificación del estudio

En Costa Rica, la demarcación vial es un componente esencial para garantizar la seguridad y la eficiencia del tráfico en nuestras carreteras. Sin embargo, el uso de la pintura plástica en frío, una tecnología emergente en el campo de la demarcación vial aún no está regulado por una normativa específica en el país. La ausencia de una normativa que respalde su uso impide su adopción en contrataciones públicas y limita su implementación en proyectos viales.

La pintura plástica en frío representa una tecnología relativamente nueva en Costa Rica, y hasta la fecha, no se ha realizado una evaluación exhaustiva sobre su comportamiento y desempeño en las condiciones locales. Esta tecnología ha demostrado ser prometedora en otros países, con potenciales ventajas sobre las pinturas tradicionales a base de solventes y termoplásticas. Sin embargo, es crucial comprender su rendimiento específico en el contexto costarricense para evaluar su viabilidad y beneficios potenciales.

Desde el punto de vista ambiental, la pintura plástica en frío ofrece ventajas significativas. A diferencia de las pinturas tradicionales, esta tecnología utiliza menos material y no requiere de calderas para su aplicación, lo que reduce la generación de calor y la contaminación asociada. Esta característica no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también disminuye los costos operativos y el impacto ecológico. (Cruz, Klein, & Steiner, 2016)

Costa Rica, con su topografía quebrada y su clima tropical, enfrenta desafíos particulares en la demarcación vial. La neblina y las condiciones climáticas pueden afectar la visibilidad de las marcas viales, lo que resalta la necesidad de materiales que ofrezcan un rendimiento superior en estas circunstancias. La pintura plástica en frío podría ofrecer una solución eficaz, con una mejor durabilidad y visibilidad en comparación con las opciones actuales. (Biocomponentes del Centro S. de R.L. de C.V., 2021)

Además, el uso de materiales de alta calidad y duraderos puede reducir significativamente la frecuencia de la redemarcación de las vías. Esta reducción en la necesidad de mantenimiento no solo tiene un impacto positivo en la inversión económica, sino que también disminuye los gastos administrativos asociados con la re-demarcación. En un contexto donde los recursos públicos deben ser gestionados de manera eficiente, contar con una tecnología que minimice los costos de mantenimiento y maximice la durabilidad es fundamental. (Biocomponentes del Centro S. de R.L. de C.V., 2021)

En conclusión, la investigación sobre la pintura plástica en frío es esencial para determinar su adecuación y beneficios para el entorno vial de Costa Rica. La falta de una normativa específica y la necesidad de comprender su comportamiento en condiciones locales destacan la importancia de este estudio. Evaluar su desempeño en comparación con las tecnologías existentes permitirá establecer una base sólida para futuras decisiones de contratación y aplicación en proyectos viales, contribuyendo a una gestión más efectiva y sostenible de los recursos públicos.

1.4 Objetivo

1.4.1 *Objetivo General*

Evaluar el desempeño de la pintura plástico en frío para señalamiento vial horizontal orientado a la generación de criterios técnicos sobre su factibilidad de uso en obras viales

1.4.2 *Objetivos específicos*

- Evaluar el desempeño de la pintura plástico en frío en campo a través del monitoreo de tramos experimentales y sus propiedades de retroreflectividad.
- Comparar el comportamiento de la pintura plástico en frío contra los tipos de pintura que son de mayor uso en nuestro país mediante el análisis del deterioro de tramos experimentales en el cantón de Aserri.
- Evaluar la viabilidad técnico-económica de la demarcación vial con pintura plástico en frío en comparación con otras alternativas utilizadas en el país
- Identificar los aspectos ambientales en los que la pintura plástico en frío podría inferir en el medio ambiente.

1.5 Alcances y limitaciones

1.5.1 *Alcances*

Se evaluará el comportamiento y propiedades físicas de la pintura plástico en frío, con el objetivo de proveer información útil para generación de normativas y parámetros de aceptación.

Mediante el análisis del comportamiento en campo se identificará si existen ventajas de la pintura plástico en frío en comparación con la pintura base solvente y el material termoplástico.

En el análisis de las propiedades físicas de esta pintura se analizará la retroreflectividad, el desgaste o desprendimiento, la resistencia al deslizamiento y la adaptabilidad en paños de prueba de 120 m de largo.

Consecuentemente se definirá las desventajas de este tipo de pintura en caso de existir. Cabe señalar que cada metodología de demarcación ha sido creada para asistir necesidades específicas por lo que se procurará identificar para que condiciones es apropiada o no este tipo de pintura.

1.5.2 *Limitaciones*

Las limitaciones presentadas durante la investigación son las siguientes:

- Limitación para disponer de tramos viales de mayor longitud, lo cual impidió la ejecución de paños de prueba con extensiones más amplias. Esta restricción redujo la posibilidad de evaluar el desempeño de los materiales en condiciones operativas más representativas del tránsito real, limitando así la generalización de los resultados a escenarios de mayor escala.

- Una de las principales limitaciones fue la limitada disponibilidad de información técnica y accesible sobre el impacto ambiental de la industria de la demarcación vial. Existe escasa documentación que aborde los efectos ambientales de los materiales utilizados, tanto en su fabricación como en su aplicación y degradación. Esto dificultó la comparación entre tecnologías y obligó al uso de fuentes secundarias.

1.6 Hipótesis

Esta investigación es en parte exploratoria y por su naturaleza se cuestiona sus propiedades, entre los aspectos más relevantes a cuestionar se encuentran los siguientes:

- **Desprendimiento:** "La pintura plástica en frío presenta un menor índice de desprendimiento en comparación con la pintura a base de solventes y termoplásticas."
- **Comportamiento en Secciones Deterioradas:** "La pintura plástica en frío ofrece un mejor desempeño en secciones de carretera con deterioros por fatiga en la mezcla asfáltica, en comparación con el material termoplástico."
- **Rentabilidad Económica:** "La pintura plástica en frío es más rentable económicamente que la pintura a base de solvente y termoplástica, debido a su costo más bajo y a su mayor durabilidad en aplicaciones de demarcación vial."
- **Retroreflectividad:** "La pintura plástica en frío tiene un desempeño igual o superior en retroreflectividad comparado con la pintura a base de solventes y el material termoplástico, mejorando la visibilidad de las demarcaciones viales."
- **Aspecto Visual:** "La pintura plástica en frío proporciona un mejor aspecto visual en las demarcaciones viales en comparación con la pintura a base de solventes y el material termoplástico, resultando en una mayor visibilidad y estética."
- **Facilidad y Seguridad de Aplicación:** "La pintura plástica en frío es más fácil y segura de aplicar en comparación con el material termoplástico, facilitando el proceso de demarcación vial y reduciendo los riesgos asociados."
- **Impacto ambiental:** La pintura plástica en frío genera un menor impacto ambiental en comparación con la pintura base solvente y el material termoplástico, debido a su bajo contenido de compuestos orgánicos volátiles (COV), la ausencia de procesos térmicos durante su aplicación y su mayor durabilidad, lo que reduce la frecuencia de mantenimiento y la generación de residuos.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

La presente investigación se enfoca en la innovación en el sector vial, explorando materiales tecnológicos avanzados que prometen optimizar los trabajos de demarcación en carreteras, en este caso puntual la pintura plástico en frío. En este contexto, se presenta un marco teórico que detalla los conceptos fundamentales necesarios para la comprensión integral de este estudio.

- **Normativas:** Se analizan las normativas vigentes, tanto a nivel nacional en Costa Rica como en el ámbito internacional, que rigen los trabajos de demarcación vial, estableciendo el marco legal y técnico dentro del cual se desarrolla la investigación.
- **Materiales:** Se realiza una caracterización detallada de los diversos tipos de pintura y materiales termoplásticos empleados en la demarcación vial, destacando sus especificaciones técnicas, propiedades y aplicaciones.
- **Impacto Ambiental:** Se evalúa el impacto ambiental de la pintura plástica en frío, considerando su ciclo de vida, su potencial contaminante y su contribución a la sostenibilidad vial.
- **Retroreflectividad:** Se examina el fenómeno de la retroreflectividad en la demarcación vial, su importancia para la seguridad nocturna y los métodos para su medición y evaluación.
- **Desprendimiento de la demarcación:** Se describen los criterios y métodos para la determinación de desprendimiento de la demarcación, así mismo permitiendo determinar su calidad, uniformidad y durabilidad.

A través de este marco teórico, se busca proporcionar al lector una base sólida de conocimientos técnicos que permita comprender a cabalidad la relevancia y el alcance de esta investigación, así como su potencial para transformar el futuro de la demarcación vial.

2.1.1 Descripción de la pintura plástico en frío

La pintura de demarcación vial basada en resina de metilmetacrilato (MMA), nombrada también bajo las denominaciones de plástico en frío, termoplástico en frío o pintura de dos componentes, constituye una tecnología de vanguardia con un alto potencial para el sector de la ingeniería de seguridad vial en Costa Rica. Este material innovador representa un avance significativo en el campo de las demarcaciones horizontales, ofreciendo una serie de ventajas técnicas que la posicionan como una alternativa competitiva frente a las pinturas convencionales de uso frecuente. Sus beneficios inherentes abarcan una metodología de aplicación optimizada, un rendimiento superior en términos de durabilidad y visibilidad, una reducción intrínseca de los riesgos operativos durante su aplicación, y una propuesta de valor con precios accesibles, entre otros atributos que la consolidan como una solución de demarcación vial de alto desempeño. (Empresa Portuaria Valparaíso, s.f.)

La pintura plástico en frío requiere de 3 componentes para su aplicación y se describen a continuación

Componente A

Este componente es una resina metracrilica, con cargas minerales, pigmentos, aditivos y microesferas de vidrio según sea el tipo de aplicación.

Componente B

Este material es el componente endurecedor llamado catalizador.

Componente C

Este material es una resina metácrilica de menor reactividad sin aceleradores, sin cargas mineras aditivos y pigmentos. (Associacao Brasileira de Normas Técnicas, 2016)

La pintura plástico en frío permite mezclar diferentes dosificaciones que dependen del tipo de demarcación que se requiere realizar y esto a su vez determina el equipo que se utilizará. Esta pintura se trabaja por lo general con dos relaciones de mezcla distintas, 1:1 y 98:2. Estas relaciones de mezcla las define el fabricante. (Empresa Portuaria Valparaíso, s.f.). A continuación se indica algunas características de estas dosificaciones.

Pintura MMA 1:1

La denominación 1:1 se refiere a que se utiliza 50% del componente A y 50% de la mezcla del componente B y C (46% de resina y 4% de reactivo catalizador). Esto significa que antes de realizar la mezcla final el producto ya se encuentra en una reacción lenta. La relación 1:1 se utiliza por facilidad, sin embargo supone riesgos operativos que pueden dañar los equipos de aplicación. (Empresa Portuaria Valparaíso, s.f.)

Pintura MMA 98:2

La denominación 98:2 se refiere a que esa pintura cuenta con un 98% de resinas y un 2% de peróxido para su reacción. Este 2% es variable dependiendo de condiciones atmosféricas, es importante que el equipo utilizado sea capaz de revisar estas tolerancias para asegurar la mejor aplicación. (Empresa Portuaria Valparaíso, s.f.)

Las ventajas de la relación de mezcla 98:2 es que solo se activan los materiales que efectivamente se van a utilizar reduciendo así las pérdidas de material. Además al existir un mínimo de material reaccionado en los equipos de aplicación existe un mínimo riesgo de daño por mala manipulación. (Empresa Portuaria Valparaíso, s.f.)

Este tipo de material para demarcación vial es aplicado y producido en diferentes países alrededor del mundo, según el ingeniero Leonardo Ronderos Arias en su tesis titulada Viabilidad técnica de utilizar la Pintura plástica en frío de 2 componentes para señalización horizontal en el departamento de Risaralda identifica varias empresas productoras de esta pintura y se indican a continuación (Rondero Arias, 2021):

Empresas Europeas y Asiáticas

Alemania

- Geveko Markings: Productora de plásticos en frío para marcación vial — Plasti Route
- HOFMANN: esta empresa fabrica equipos de demarcación vial

Dinamarca

- Geveko Markings: Productora de plásticos en frío para demarcación vial — PlastiR Route

China

- Beijin Roadsafe Technology Co, Ltd
- Hangzhoy Eaglerd Traffic Inustry and Trade Co, Ltd,
- Hangzhoy Eaglerd Traffeic Industry and Trade Co Ltd.

España

- Faplisa: Productora de plásticos en frío para demarcación vial Ralva5115-2
- Doscrill: Productora de plásticos en frío para demarcación
- Grupo Villar: Productora de plásticos en frío para demarcación vial

Empresas de America

Colombia

- Global Petroquímica S.A.S: Productora de plásticos en frío para demarcación
- Pintuco: Productora de plásticos en frío para demarcación
- EyS Ltda: esta empresa fabrica equipos de demarcación vial
- Invisenales SAS: Productora de plásticos en frío para demarcación y aplicación de la demarcación

Chile

- Garbar pintura: Productora de plásticos en frío para demarcación

Estados Unidos

- DyC Parking Lot: Aplicación de la demarcación

A partir de la información anterior se identifica que este tipo de material cuenta con una gran gama de empresas fabricantes, no así las empresas fabricantes de los equipos para su aplicación.

La empresa Protecto Costa Rica S.A. (R) (AkzoNobel Paints) en el documento Referencia para la especificación de Pinturas Plástico en Frio a base de Resinas Metácrilica Reactivas indica algunas de las ventajas de este tipo de pintura y se indican textualmente a continuación.

Fácil aplicación: No requiere calentamiento ni maquinaria especializada, lo que reduce costos y tiempo de instalación.

Durabilidad superior: Resiste mejor las condiciones climáticas extremas, el desgaste por tráfico y la abrasión, prolongando la vida útil de la señalización.

Mayor visibilidad: Los colores y las propiedades reflectantes del plástico en frío son más intensos y duraderos, mejorando la visibilidad nocturna y la seguridad vial.

Versatilidad: Se puede aplicar en diferentes superficies, incluyendo asfalto, concreto, adoquines y metal.

Sostenibilidad: Es una tecnología amigable con el medio ambiente, ya que no produce emisiones de gases ni residuos contaminantes

Entre otras ventajas se encuentran:

- Posee una gran adherencia sobre firmes bituminosos y sobre repintados
- No contiene metales pesados
- Rápido secado
- Flexibilidad: se adapta a las irregularidades de la calzada
- Resistencia a la intemperie

La pintura plástica en frío se aplica con diferentes técnicas por ejemplo: aplicación con espátulas, por extrusión o pulverizado(spray). Cada una de estas se describe a continuación:

Pulverizado: Esta técnica consiste en aplicar la demarcación mediante pistolas a compresión similar al sistema de demarcación con pintura base solvente. Para pintar por pulverización se requiere de un equipo especializado que mezcla los componentes A y B inmediatamente antes de la aplicación. Con esta técnica se logra un rendimiento de demarcación de 15km durante 1 hora. El tiempo de secado es de 30 minutos para apertura al tránsito según el método UNE 135202 (Akzonobel)

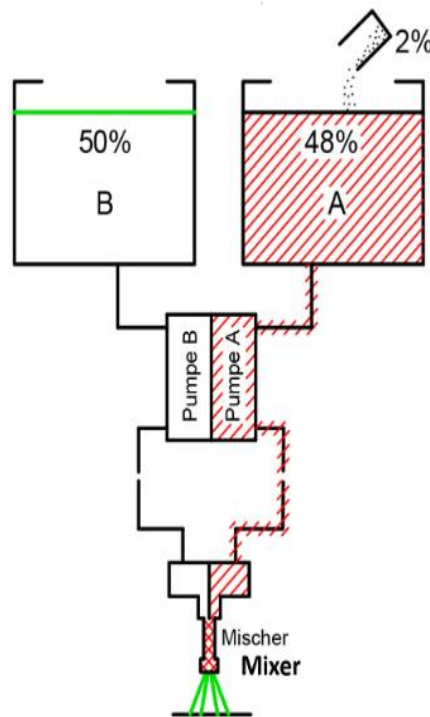


Figura 1 Pistola de aplicación y cámara de mezclado de componentes de pintura plástica en frío.

Fuente: Pagina web de la empresa Hofmann



Figura 2 Aplicación de pintura plástica en frío con técnica de pulverización

Fuente: Pagina web de la empresa Hofmann

Extrusión marcaje perfilado: Este sistema permite que el material caiga por gravedad sobre el pavimento. Su característica más distintiva es la formación de patrones irregulares en forma de resaltes o pastillas, las cuales pueden disponerse de diferentes formas. El objetivo de esta técnica es generar una señal con relieve, lo que mejora la visibilidad en condiciones de lluvia al sobresalir por encima de la película de agua que suele cubrir las señales de menor espesor. Además, contribuye a la seguridad vial al generar efectos sonoros y vibratorios cuando los vehículos circulan sobre ella, alertando a los conductores sobre una posible salida de la calzada o alerta a un cambio en la carretera o condición de riesgo. (Hofmann, s.f.)



Figura 3 Marcaje perfilado con extrusión, pintura plástica en frío

Fuente: página oficial empresa la empresa Hofmann

Extrusión líneas: esta técnica se aplica mediante dados de arrastre para líneas continuas laterales y centrales de las vías. Esta técnica mezcla los componentes en un compartimento antes de entrar al dado.



Figura 4 Aplicación de pintura plástico en frío por extrusión
Fuente: página oficial empresa la empresa Hofmann



Figura 5 Demarcación por extrusión de pintura plástico en frío
Fuente: página oficial de la empresa Pintraf

Llaneta: esta técnica es manual y se requiere el uso de una llaneta para realizar la distribución del material en el área deseada. Al igual que la técnica por extrusión el catalizador es mezclado en un recipiente con la pintura previo a la demarcación y se debe iniciar la aplicación inmediatamente. En este caso la empresa Pintuco maneja únicamente dos componentes a diferencia de la aplicación por pulverización que son tres componentes.

Se recalca que para la aplicación con llaneta se requiere de mayor tiempo para el curado de la pintura ya que depende de la velocidad de una persona para mezclar los componentes y posteriormente para aplicar y distribuir en al figura que demarcará.

Con esta técnica se logra espesores de 1.2mm, el tiempo de secado al tacto es de 12 a 15 minutos y para apertura a tránsito de 40 minutos mínimo, el rendimiento de este producto varía con las marcas sin embargo ronda los 3 m² por galón. La relación de catalizador para esta técnica es de 98:2 o sea un 98% de producto con un 2% de catalizador. (Pintuco)



Figura 6 Demarcación de pintura plástico en frío con llaneta
Fuente: Fuente: página oficial de la empresa Pintraf

2.1.2 Pintura plástico en frío en Costa Rica

La pintura plástico en frío representa una tecnología emergente en el contexto costarricense, cuya implementación inicial se ha orientado principalmente hacia la demarcación de áreas como estacionamientos y canchas deportivas. No obstante, en la actualidad se están ejecutando algunos proyectos piloto sobre carreteras públicas con el fin de que los gestores viales puedan conocer de primera mano las características, ventajas y limitaciones de este producto. Estas iniciativas tienen como propósito promover el conocimiento técnico sobre esta alternativa y explorar su viabilidad en condiciones reales de servicio.

Cabe señalar que actualmente, Costa Rica no dispone de una norma técnica específica que regule los parámetros físicos y químicos que deben ser verificados en laboratorio para este tipo de pintura, ni establece directrices para su correcta aplicación en campo. Tampoco existen criterios estandarizados para la aceptación técnica de los trabajos de demarcación vial ejecutados con este material.

En el país, las principales empresas que actualmente aplican pintura plástico en frío son Mecsa y Celco, ambas con experiencia en obras de infraestructura vial. En el caso de Mecsa, esta empresa se dedica principalmente a la ejecución de obras de pavimentación, aplicación de sellos asfálticos y demarcación vial. Mecsa adquiere la pintura plástica en frío a través de la empresa Protecto, la cual, a su vez, la compra a Pintutráfico.

Por su parte, Celco es una empresa costarricense con operaciones regionales en El Salvador y Guatemala. Su actividad industrial abarca la fabricación de una amplia gama de productos, entre los que se incluyen pinturas para distintos tipos de superficies, recubrimientos anticorrosivos, impermeabilizantes, esmaltes, sistemas epóxicos, pinturas para demarcación vial, productos de mantenimiento industrial de alta exigencia, solventes puros, diluyentes, recubrimientos para madera y acabados automotrices, consolidándose como un actor relevante en la industria de recubrimientos de la región.

2.1.3 Sistema de demarcación Vial

El LanammeUCR en su primer informe del proyecto 21-B6-A55 define la demarcación vial como un sistema integrado de la siguiente forma: “Se le llama sistema de demarcación vial al estar conformado por más de un componente. Un sistema simple de demarcación vial consiste en un material de base, el cual puede ser pintura (base solvente o base agua), termoplástico, cintas preformadas, plástico en frío, entre otros tipos, junto a las microesferas de vidrio, las cuales proveen al sistema de visibilidad nocturna. El material por sí solo no es retrorreflectivo; es decir, no es visible en condición nocturna y, por otra parte, las microesferas de vidrio requieren de un medio para adherirse y poder reflejar la luz que incide en ellas hacia la dirección deseada”. (LanammeUCR, PITRA, 2017)

2.1.4 Normativa en Costa Rica para pinturas y materiales de demarcación vial.

Los trabajos de demarcación vial son fiscalizados de varias formas según sea el impacto del proyecto respecto al campo social, recursos invertidos y tipo de obra. Adecuadamente los trabajos deben cumplir estándares de calidad y ser inspeccionados por profesionales preparados en este campo.

La regulación más utilizada que se aplica en el país son el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes (CR-2020) y normas creadas por INTECO.

LanammeUCR en uno de sus boletines se refiere a INTECO de la siguiente forma: A partir del año 2011, se conformó el Comité CTN-11 de INTECO para la normalización de los ensayos de calidad de las pinturas de tránsito (base agua, base solvente y termoplástica), así como de las microesferas de vidrio. Este comité de INTECO está integrado por miembros de diferentes sectores, incluyendo la Administración (CONAVI e Ingeniería de Tránsito), el LanammeUCR, los fabricantes de pinturas, y las empresas que se dedican a la demarcación vial. (LanammeUCR, PITRA, 2014)

En la página oficial de INTECO Costa Rica, se define a este ente de la siguiente forma:

“INTECO es el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica; una asociación privada, sin ánimo de lucro, creada en 1987 y con alcance internacional para brindar soluciones a los diversos sectores y promover el desarrollo sostenible de las sociedades en las que opera.

Durante los periodos 2018-2020 y 2023-2025, INTECO ocupa uno de los 20 cargos en el Consejo Directivo de la ISO* y la presidencia de COPANT, lo que representa un beneficio para Costa Rica, ya que cuanto más fuerte sea su ente nacional de normalización, mayores serán las oportunidades y herramientas que los diferentes grupos de interés (consumidor, estado, empresas, sociedad) puedan aprovechar.”

Por otro lado en lo que respecta a normativa en Costa Rica se cuenta con un Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes comúnmente conocido como (CR-2020). Respecto al CR-2020 y la demarcación vial, este documento dirige al lector a aplicar las normas de INTECO por ejemplo para pintura base agua INTE Q44-1, para pintura base solvente INTE Q44-2, para material termoplástico INTE Q44-3 y para microesferas de vidrio INTE Q45, (MOPT, 2024)

En el CR-2020 no se considera la pintura plástica en frío como material para demarcación vial.

El LanammeUCR en el boletín titulado *Actualización del CR-2020: Principales cambios de estructura y contenido del Volumen 1 Manual de Especificaciones Generales para la Construcción*

de Carreteras, Caminos y Puentes describe al CR-2020 de la siguiente forma: Este Manual de Especificaciones tiene como objetivo establecer un marco normativo técnico de observancia obligatoria y actualizado para el Sector de Infraestructura Vial de Costa Rica, aplicable a las diferentes fases del ciclo de vida de los proyectos (planificación, diseño, mantenimiento y operación); así como a las áreas de la ingeniería asociadas (tales como: seguridad vial, movilidad, socioambiental, entre otros) y está conformado por nueve volúmenes, de los cuales, el Volumen 1 Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes, denominado CR-2020 corresponde al volumen de mayor aplicación en el país actualmente, al contener las especificaciones técnicas para la construcción de una carretera o puente en nuestro país. (LanammeUCR, 2014)

2.1.5 Normativas internacionales para la aplicación de plástico en frío

En Costa Rica, una estrategia para la creación de normativa técnica ha sido la tropicalización de estándares internacionales. En el ámbito específico de la pintura plástica en frío, países como Colombia y Brasil han desarrollado regulaciones para asegurar la correcta aplicación y aceptación de las demarcaciones viales realizadas con este tipo de material. Por consiguiente, esta sección presenta una investigación de las normativas y la información técnica generada por estas naciones pioneras en el uso de la pintura plástica en frío.

Este análisis se enfoca en aspectos técnicos y resulta fundamental, ya que proporciona rangos de referencia para parámetros funcionales como espesores y niveles de retroreflectividad, además de detallar los procedimientos de aplicación, las propiedades físicas esenciales, los cuidados especiales requeridos, así como las ventajas y desventajas inherentes al material.

En Colombia las normas sobre plástico en frío son: NTC 4744-1 (materiales de demarcación), NTC 4744-2 (equipos), NTC 4744-3 (retroreflectividad), NTC 4744-4 (control de la aplicación), NTC 1360 (pinturas para demarcación de pavimentos).

En el caso de Brasil la norma que regula la demarcación y materiales de la pintura plástica en frío es ABNT NBR 15870-2016 (Sinalização horizontal viária — Plástico a frio à base de resinas metacrílicas reativas -Fornecimento e aplicação).

Otro país que realiza demarcaciones con plástico en frío es México, sin embargo, esta nación no ha generado normativa referente.

2.1.5.1 Norma Brasileña

Brasil cuenta con la norma ABNT 15870 que regula la calidad de la pintura plástica en frío y la aplicación. Fundamentado en esta norma a continuación se expone algunas consideraciones técnicas.

Para todas las técnicas de aplicación rige los siguientes cuidados:

- La pintura plástica en frío es compatible con demarcaciones de bases acrílicas, metácrilica, base agua, plástico en frío, y material termoplástico.
- Respecto a la temperatura de aplicación esta puede estar en el rango de 5°C y 45°C, esta condición permite que la pintura sea aplicada en condiciones de temperatura muy variables, desde sitios fríos hasta sitios bastante calientes. Se relacionar la temperatura de la superficie, la humedad del aire y el punto de rocío, para esto se debe consultar la tabla 18 (punto de rocío) de la norma en cuestión (ABNT 15870). La temperatura del pavimento puede estar bastante fría, 3°C por encima del punto de rocío pero no debe estar lloviendo.

- La pintura plástica en frío se aplica con diferentes técnicas, las cuales son: pulverización, extrusión, dispersión, las cuales se describen:

1) **Aspersión, (spray):**

La aplicación pulverizada maneja es deben ser entre 0,3mm y 1,2mm.

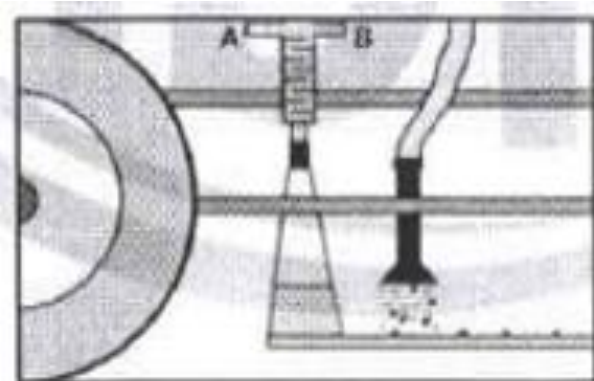


Figura 7 Técnica de pulverización

Fuente: Plástico en frío suministro y aplicación en la señalización vial horizontal. Norma ABNT 15870.

Se puede utilizar dos tipos de esfera, esto depende del espesor de la membrana

- Tipo II, son microesferas entre los 600 μ a 800 μ con tratamiento de silano
- Tipo II C, son microesferas entre los 600 μ a 1500 μ con tratamiento de silano, ver normas ABNT NBR6831 Y ABNT NBR 14281

Extrusión:

La aplicación por extrusión puede ser mecánica utilizada para líneas longitudinales o manual para símbolos y leyendas.

Los espesores que se aplican con este método varían entre los 1,5mm y 3mm

El tipo de esfera que se debe aplicar es tipo II entre los 600 μ a 800 μ con tratamiento de silano

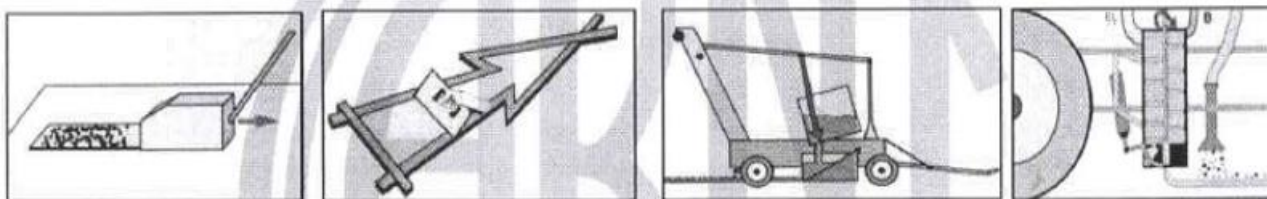


Figura 8 Método de colocación de pintura plástica en frío por extrusión de forma manual y mecánica

Fuente: Plástico en frío suministro y aplicación en la señalización vial horizontal. Norma ABNT 15870.

Aspersión, (spray) estructural

La aplicación dispersión puede ser mecánica o manual. La aplicación mecánica es para listones longitudinales y la aplicación manual es para franjas longitudinales, transversales, símbolos y leyendas.

Este tipo de técnica es estructural y su espesor alcanza máximo 5mm.

El rendimiento de este tipo de demarcación ronda entre 2,5kg/m² a 3,5kg/m²

Sobre la esfera que se utiliza es la tipo II C se aplica hasta 500g/m², el tamaño de la microesfera varia entre 600 μ a 800 μ (ABNT NBR 6831) con tratamiento de silano

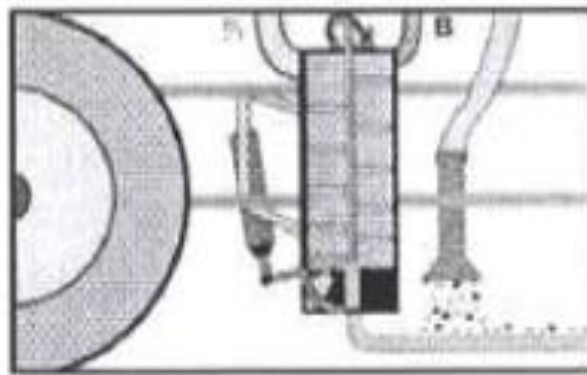


Figura 9 Aplicación por dispersión

Fuente: Plástico en frío suministro y aplicación en la señalización vial horizontal. Norma ABNT 15870.

Extrusión estructural

La aplicación por extrusión estructural puede ser mecánica o manual. La aplicación mecánica es para líneas longitudinales y la aplicación manual es para franjas longitudinales, transversales para la reducción de velocidad.

El espesor debe ser en el rango de 4mm y 7mm

Retroreflectividad: pulverización hasta de 300g/m² a 500 g/m² de microesferas(rango predominante de 600 a 800) tipo II C (ABNT NBR 6831) con tratamiento de silano

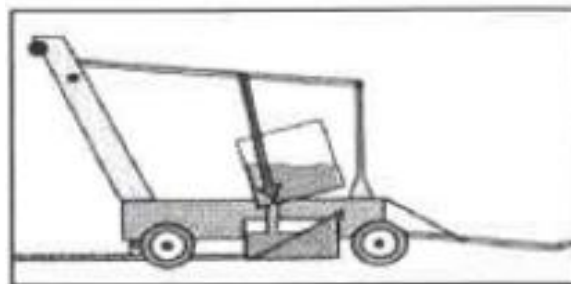


Figura 10 Aplicación con método de extrusión (alto relieve)

Fuente: Plástico en frío suministro y aplicación en la señalización vial horizontal. Norma ABNT 15870.

Rollo

Esta técnica se utiliza en sitios de poco y liviano tránsito como lo son corredores, ciclovías y aceras.

El espesor de esta membrana debe ser entre 1mm y 3 mm y se puede aplicar una o dos capas. En caso de colocar dos capas la primera capa debe ser de 2mm y la segunda debe ser entre 0,3mm y 1mm

Antideslizante: en la demarcación con las técnicas de aspersión, extrusión y rollo se debe reducir el riesgo deslizando, mediante la aplicación de un componente en forma de aspersión. Este compuesto se mezcla con la microesfera, la cantidad de este compuesto no puede exceder el 20% de la masa de la mezcla y su tamaño no puede afectar la capacidad de retroreflectividad.

Coordenadas Cromáticas

Las coordenadas cromáticas para la aceptación del color de la demarcación que define la norma ABNT 15870, son las siguientes:

Tabla 1 *Coordenadas cromáticas para pinturas de demarcación vial*

Coordenada/ Color	1	2		3		4		Y%		
	X	y	X	y	X	y	X	y	Mínimo	Máximo
Blanca	0,355	0,355	0,305	0,305	0,285	0,325	0,335	0,375	75	-
Amarilla	0,443	0,399	0,545	0,455	0,465	0,535	0,389	0,431	40	55
Verde	0,480	0,320	0,500	0,280	0,580	0,300	0,560	0,375	10	25
Azul	0,180	0,260	0,220	0,200	0,250	0,200	0,260	0,280	5	15
Utilizar espectrofotómetro con geometría esférica d/8 o u direccional 45°/0° como iluminante D 65 e Angulo de observación de 10°.										

Fuente: Norma: Sinalização horizontal viária - Plástico a frio à base de resinas metacrílicas reativas - Fornecimento e aplicação, 15870-2010.

La norma brasileña Sinalização horizontal viária - Plástico a frio à base de resinas metacrílicas reativas - Fornecimento e aplicação, 15870-2010 clasifica la pintura plástica en frío en 5 tipos y se describen a continuación:

Tipo I: consta de tres componentes (tricomponente) A,B,C, la mezcla se compone 1:1. No tienen microesfera en la composición.

Tipo II: consta de dos componentes (bicomponente) A,B la mezcla se compone 98:2. No tiene microesfera en la composición.

Tipo III: material de dos componentes (componentes A y B), sistema 98:2, de baja viscosidad, que puede si en su composición se incorporan o no granos abrasivos.

Tipo IV: material bicomponente (componentes A y B), sistema 98:2, con microesferas de vidrio incorporadas en su composición

Cada uno de estos tipos tiene propiedades diferentes que se analizan con ensayos de laboratorio.

La norma 15870-2010 determina rangos de aceptación para este tipo de pintura dependiendo de la técnica con la que aplica. Entre las variables que toma en consideración se encuentran las siguientes:

- Masa específica (g/cm³)
- Coordenada cromática
- Viscosidad Daniel Flow
- Estabilidad, variación del DF de apariencia
- Dureza después 24 horas
- Tipo de resina
- Resistencia a la luz –100h

2.1.5.2 Norma Colombiana

En Colombia, los trabajos de demarcación vial se encuentran regulados por un conjunto normativo que tiene como finalidad estandarizar los procedimientos y garantizar la calidad de las intervenciones en la red vial. En particular, la pintura plástico en frío se encuentra contemplada en las normas técnicas colombianas NTC 4744-1, NTC 4744-2, NTC 4744-3 y NTC 4744-4. Este compendio normativo abarca los requisitos técnicos de los materiales empleados en demarcación horizontal, las especificaciones de los equipos de aplicación, los niveles mínimos de retrorreflectividad exigidos, así como los lineamientos para el control de calidad durante y posterior a la aplicación del producto.

La norma colombiana NTC4744-1:2023 *nombrada Aplicación de Materiales para la Demarcación horizontal de Pavimentos, parte 1: materiales de demarcación* hace varias indicaciones sobre la pintura plástico en frío, entre ellas:

- Los materiales de pintura plástico en frío deben cumplir la norma NTC1360
- Los espesores normados de esta pintura deben cumplir la norma NTC 4744-44

La norma NTC 4744-4:2023, *Aplicación de Materiales para la Demarcación horizontal de Pavimentos, Parte 4: Control de aplicación*, desarrolla aspectos sobre la pintura plástico en frío, los cuales se indican a continuación:

Preparación de la superficie: En esta norma se detalla el proceso de demarcación vial. A continuación se describen los respectivos a la demarcación con plástico en frío.

- Inspección del pavimento: verificar si es necesario la aplicación de algún tratamiento antes de demarcar, esto dependiendo si es rígido o flexible y el sí es una superficie nueva, limpieza.
- Cuando en sitio existe demarcación podría repintarse pero se debe considerar los siguientes aspectos:

- Se debe medir la retroreflectividad, si esta es igual o superior a la indicada en la norma NTC44-3 numeral 5.2 se debe desgastar la demarcación para la eliminación de la microesfera la cual disminuiría la adherencia
- Hacer un chequeo de la adherencia de la demarcación existente según la norma NTC811, la adherencia debe ser superior a 4A de lo contrario se debe desprender la demarcación.
- Para el repintado de las vías se debe solicitar al fabricante de la pintura información sobre la adherencia de la pintura nueva en relación con la existente, y el fabricante o distribuidor debe realizar los ensayos de adherencia para asegurar esta capacidad. El fabricante debe hacer chequeos de adherencia y dar garantía de la adherencia cuando hay redemarcación.
- Cuando se apique repintado de vías de igual forma los parámetros de aceptación de la retroreflectividad son los mismos.
- Aplique la demarcación y mida la adherencia a las 8 horas. La adherencia debe ser superior a 4A según la norma NTC 811.
- Cuando se aplica una redemarcación, los espesores deben corresponder a los indicados en la siguiente tabla

Tabla 2 *Espesor mínimo de película seca de material de demarcación*

Tipo de material	Pintura acrílica			Termoplástica		Plástico en frío (C-metil metacrilato)				
	Base solvente (B)	Base agua (AI)	Base agua alto espeso (AII)	Termoplástica por extrusión	Termoplástica por pulverización	Pulverización	Llana	Máquina automática	Rodillo	Multipunto y estructura
Espesor mínimo	229 micras (9 mils)	229 micras (9 mils)	305 micras (12 mils)	2286 micras (90 mils)	1524 micras (22 mils)	559 micras (22 mils)	1143 micras (45 mils)	1143 micras (45 mils)	559 micras (22 mils)	N/A
g/m ² mínimo	610	610	813	4904	2740	1200	2450	2450	1200	2600
Nota 1 En general, a mayores espesores, mayor duración. Nota 2 Para las aplicaciones de materiales para demarcaciones viales, cuya geometría sea diferente a una superficie plana (véase numeral 3.5), tales como las generadas por aglomerado, estructura, perfilado o multipunto, entre otras, se determinará como elemento de control un consumo mínimo en g/m², de acuerdo con las recomendaciones del fabricante, según el diseño de la demarcación.										

Fuente: NTC 4744-4:2023, Aplicación de materiales para la demarcación horizontal de pavimentos, Parte 4: control de aplicación, pág. 4

Se presenta la caracterización de adherencia entre pinturas:

Tabla 3 *Adherencia entre tipo de pintura para redemarcación*

Nueva aplicación	Material existente				
	Acrílica base solvente	Plástico en frío	Termoplástica	Marcas viales prefabricadas	Acrílica base agua
Acrílica base solvente	Excelente	Buena	Buena	Buena	Buena
Plástico en frío	Buena	Buena	Nula o baja	Buena	Buena
Termoplástica	Buena	Nula o baja	Excelente	Buena	Buena
Marcas viales prefabricadas	Nula o baja	Nula o baja	Nula o baja	Excelente	Nula o baja
Acrílica base agua	Excelente	Nula o baja	Excelente	Buena	Excelente

Fuente: NTC 4744-4:2023, Aplicación de materiales para la demarcación horizontal de pavimentos, Parte 4: control de aplicación, pág. 4

- No se debe demarcar en condiciones de lluvia o cuando la temperatura del ambiente a la sombra sea inferior de 5°C o superior a 40°C
- No se debe demarcar cuando el viento sea mayor que 20km/hora
- No se debe demarcar cuando la temperatura del pavimento sea superior a 48°C a no ser que el fabricante lo autorice.
- No se debe demarcar cuando la humedad relativa es superior a 80% y la temperatura de la superficie debe ser mínimo 3°C por encima del punto de riego con el objetivo de que el vapor de agua no afecte la calidad de la pintura
- Se debe verificar la humedad de la superficie, esta debe ser inferior a 5%
- Esta norma considera el factor para asegurar que la pintura contraste lo suficiente para que sea visible, siendo el factor de contraste mínimo de 1,7.

Recomendaciones específicas para pintura plástico en frío

- Por tratarse de 2 y 3 componentes se debe homogenizar muy bien antes del ser utilizados
- Debido a la utilización de catalizadores se debe aplicar, normalmente antes de los 5 minutos, de haber sido mezclado el catalizador, procurando la aplicación antes de que la reacción caliente la mezcla
- Si se mezclará cantidades superiores a 1 galón se debe usar mezclador mecánico
- La limpieza de los equipos es con acetona o el recomendado por el fabricante.
- No se debe dejar secar los productos de la pintura en los recipientes debido a las reacciones químicas producto de la reacción exotérmica la cual podría calentar hasta una ignición
- En carpetas asfálticas nuevas se debe dejar fraguar la carpeta mínimo 28 días. De requerirse la demarcación antes de este tiempo se recomienda aplicar una capa delgada de 7mil húmedos sin esfera y luego proceder con la aplicación de la capa completa de recubrimiento.
- Se recomienda no exponer la demarcación durante 40 minutos

La retroreflectividad es uno de los parámetros más importantes en la evaluación y aceptación de la demarcación vial en Colombia, ya que está directamente relacionada con la visibilidad nocturna y la seguridad vial. En el Manual de Diseño Geométrico para Carreteras del Ministerio de Transporte Colombiano, se establece la clasificación funcional de las carreteras, primarias, secundarias y terciarias, la cual influye en los requisitos técnicos de diseño y aceptación de los elementos de señalización, incluida la demarcación horizontal.

Textualmente el Manual de Diseño Geométrico para Carreteras del Ministerio de Transporte Colombiano clasifica las carreteras según las siguientes características:

Primarias: Son aquellas troncales, transversales y accesos a capitales de Departamento que cumplen la función básica de integración de las principales zonas de producción y consumo del país y de éste con los demás países. Este tipo de carreteras pueden ser de calzadas divididas según las exigencias particulares del proyecto. Las carreteras consideradas como Primarias deben funcionar pavimentadas.

Secundarias: Son aquellas vías que unen las cabeceras municipales entre sí y/o que provienen de una cabecera municipal y conectan con una carretera Primaria. Las carreteras consideradas como Secundarias pueden funcionar pavimentadas o en afirmado.

Terciarias: Son aquellas vías de acceso que unen las cabeceras municipales con sus veredas o unen veredas entre sí. Las carreteras consideradas como Terciarias deben funcionar en afirmado. En caso de pavimentarse deberán cumplir con las condiciones geométricas estipuladas para las vías Secundarias (Instituto Nacional de Vías, 2008)

Colombia ha adoptado criterios específicos de retroreflectividad mínima exigida según la clasificación de la vía, con el objetivo de garantizar un nivel adecuado de desempeño visual bajo condiciones de baja iluminación o visibilidad. Estos valores sirven como umbral de aceptación durante la recepción de obra o intervención vial.

Es importante destacar que, independientemente del tipo de pintura, material termoplástico o cinta prefabricada, la retroreflectividad debe cumplir con los niveles mínimos establecidos. El cumplimiento de estos valores garantiza que la demarcación sea eficaz durante su vida útil inicial y contribuye a la reducción de accidentes de tránsito.

A continuación, se presenta la tabla con los valores de retroreflectividad requeridos (medidos en mcd/m²/lux) según la clasificación funcional de la vía:

Tabla 4. *Valores mínimos de retroreflectividad*

Color	Blanco	Amarillo
Tipo de vía	Valores mínimos de retroreflectividad (mcd/lux/m ²)	
Vía primaria	300	250
Secundaria	250	200
Terciarias	140	120
Zonas de obras	220	180

Fuente: Norma NTC:47443:2023

2.1.6 Impacto ambiental de materiales y trabajos de demarcación vial

La mejora y mantenimiento de las carreteras son esenciales para garantizar un transporte eficiente y seguro. Sin embargo, es fundamental reconocer que cualquier intervención en la infraestructura vial conlleva un impacto ambiental, y las demarcaciones viales no son una excepción. A pesar de su importancia en la organización del tráfico y la seguridad vial, la producción y aplicación de las demarcaciones viales pueden generar una serie de contaminantes que afectan el entorno.

2.1.6.1 Producción y Aplicación de Demarcaciones Viales

Las demarcaciones viales, que incluyen marcas en el pavimento y señales, requieren de diversos productos químicos para su producción. Estos productos, como las pinturas y recubrimientos, suelen contener compuestos orgánicos volátiles (COV) y otros químicos que pueden liberar contaminantes al medio ambiente. La presencia de estos compuestos no solo afecta la calidad del aire durante la aplicación, sino que también puede tener efectos a largo plazo en la salud ambiental.

A continuación se presenta características y consecuencias ambientales generados por cada uno de los materiales abordados en esta investigación.

1. **Demarcaciones con solventes:** Las pinturas a base de solventes son conocidas por su durabilidad y adherencia. Sin embargo, su aplicación puede liberar grandes cantidades de COVs, que contribuyen a la contaminación del aire y pueden tener efectos nocivos para la salud humana y la fauna local.
2. **Demarcaciones con plástico en frío:** Los plásticos en frío se aplican a temperatura ambiente entre 15°C y 35°C por lo que no necesita canteras para su calentamiento como la termoplástica y por otro lado esta pintura genera menos COV (Biocomponentes del Centro S. de RL, 2021). En general, tienen un menor impacto en términos de emisiones de COV comparado con las pinturas a base de solvente. No obstante, su producción también implica el uso de químicos que pueden ser perjudiciales si no se manejan adecuadamente.
3. **Demarcaciones con material termoplástico:** La técnica de aplicación más perjudicial desde el punto de vista ambiental es la aplicación de material termoplástico. Esta técnica implica el uso de una caldera que calienta el material a aproximadamente 200°C para derretirlo y aplicarlo sobre la superficie de la carretera. El proceso de calentamiento a alta temperatura no solo consume grandes cantidades de energía, sino que también genera emisiones significativas de gases contaminantes. El material termoplástico puede liberar vapores tóxicos durante la aplicación, lo que contribuye a la contaminación del aire y puede tener efectos adversos sobre la salud de las personas que trabajan en la aplicación. Por otro lado la demarcación termoplástica tiene un buen desempeño y durabilidad por lo que esta técnica ahorra la cantidad de veces que se demarque en comparación con otra pintura. Por otro lado, en la producción del material termoplástico un porcentaje de su materia prima podría ser de origen reciclado lo que disminuye la cantidad de material dirigido a vertederos (Thermapply, 2025)

2.1.7 Compatibilidad entre materiales para redemarcación vial horizontal.

En Costa Rica, la adecuada implementación de la demarcación vial es un componente esencial para garantizar la seguridad de los usuarios de la red vial. El país presenta una diversidad de microclimas que, en determinadas regiones, incluyen condiciones adversas como niebla frecuente, lo que reduce

considerablemente la visibilidad. Esta situación se ve agravada por la topografía montañosa del territorio nacional, caracterizada por carreteras sinuosas, pendientes pronunciadas y alineamientos horizontales y verticales complejos. Estas condiciones demandan la incorporación de elementos de seguridad vial que faciliten la conducción en todo momento, siendo la demarcación horizontal uno de los más relevantes.

La demarcación horizontal cumple una función fundamental al proporcionar una guía visual clara que permite al conductor mantener su trayectoria dentro del carril, anticipar maniobras y ejecutar desplazamientos seguros, especialmente en condiciones de baja visibilidad y en tramos con geometría desafiante. Por lo tanto, su conservación en condiciones óptimas constituye un elemento clave para la prevención de accidentes y la eficiencia operativa del sistema vial.

En el contexto de los trabajos periódicos de mantenimiento de demarcación horizontal, se ha observado que en algunos tramos las marcas viales presentan un desgaste total, mientras que en otros aún se conservan parcialmente visibles, aunque con valores reducidos de retrorreflectividad que podrían no cumplir con los niveles mínimos requeridos. Ante esta situación, las administraciones viales deben considerar dos alternativas: (1) realizar el retiro o borrado de la demarcación existente previo a la aplicación de nuevas marcas, o bien (2) proceder con una redemarcación superpuesta sobre las marcas anteriores.

Este tema es abordado en la tesis titulada *“Evaluación de la compatibilidad entre materiales de demarcación vial horizontal para la redemarcación sobre marcas existentes en carreteras de Costa Rica”*, elaborada por el ingeniero Juan Pablo Quesada Guerrero. Su investigación aporta criterios técnicos relevantes que permiten fundamentar la toma de decisiones respecto a la conveniencia técnica y económica de realizar el borrado de las marcas existentes o aplicar directamente una nueva capa de pintura, considerando los aspectos de compatibilidad entre materiales, la adherencia, la retrorreflectividad y los costos operativos asociados.

Del estudio supra indicado se obtuvieron las siguientes conclusiones:

Sobre los tramos de prueba en campo:

- Material termoplástico sobre pintura solvente: el material termoplástico en los colores blanco y amarillo no presentaron desprendimiento, grietas ni ningún otro tipo de daño prematuro que mostrara indicios de incompatibilidad entre los materiales
- Material termoplástico sobre termoplástico: el material termoplástico en los colores blanco y amarillo no presentaron desprendimiento, grietas ni ningún otro tipo de daño prematuro que mostrara indicios de incompatibilidad entre los materiales
- Pintura base solvente sobre pintura base solvente: la pintura base solvente en los colores blanco y amarillo no presentaron desprendimiento, grietas ni ningún otro tipo de daño prematuro que mostrara indicios de incompatibilidad entre los materiales
- Pintura base solvente sobre termoplástico: la pintura base solvente en los colores blanco y amarillo no presentaron desprendimiento, grietas ni ningún otro tipo de daño prematuro que mostrara indicios de incompatibilidad entre los materiales

Sobre el ensayo de tensión el ingeniero reza “los resultados obtenidos a partir del ensayo de tensión demostraron que la adherencia de una nueva capa de material de demarcación vial no se ve afectada por la existencia de una capa de demarcación envejecida, esto para las 4 combinaciones de materiales de demarcación vial que forman parte de la matriz de compatibilidad propuesta para Costa Rica”.

También agrega que en el caso de la existencia de base solvente como pintura envejecida esta aporta adherencia a la pintura sobrepuesta.

En el caso de la pintura plástico en frío no se logra encontrar algún estudio realizado en Costa Rica u otro por lo que en este aspecto la investigación se vuelve exploratoria.

2.1.8 Retroreflectividad

La retroreflectividad es un fenómeno óptico que permite que la luz emitida por los faros de un vehículo sea reflejada de vuelta hacia el conductor, haciendo que las líneas de la demarcación vial horizontal sean altamente visibles para los conductores, para que este fenómeno se logre se debe de aplicar microesfera a la demarcación aún fresca de forma inmediata. La aplicación de la microesfera debe ser correcta de lo contrario se causaría reflexión difusa, reflexión especular, ambas son reflexiones erróneas que no permite la visibilidad de la demarcación vial. (Mendoza, 2022)

La retrorreflexión se regula de acuerdo con parámetros geométricos definidos por estándares internacionales como los europeos (CEN EN 1436 Road Marking Materials - Road Marking Performance for Road Users) y americanos (ASTM E1710 Standard Test Method for Measurement of Retroreflective Pavement Marking Materials with CEN).

La retrorreflexividad se mide con un equipo llamado retrorreflectómetro portátil y la demarcación debe cumplir con un ángulo de iluminación (β) de $88,76^\circ$ con respecto a la normal y un ángulo de observación (V) de $1,05^\circ$ (ángulo entre el ángulo de iluminación y el eje de observación). En la literatura, el ángulo de iluminación se expresa a menudo como $1,24^\circ$, que corresponde al ángulo de iluminación complementario ($\beta_c = 90^\circ - \beta$).

Estos parámetros geométricos simulan la visibilidad por parte del conductor, desde la marca hasta una distancia de 30 m cuando esta es iluminada con los faros de un automóvil (estándar) situado a una altura de 0,65 m y el observador (ojos) está a 1,20 m de altura. La siguiente figura muestra los diferentes parámetros geométricos que representan la medida de la retrorreflexión con los diferentes dispositivos.

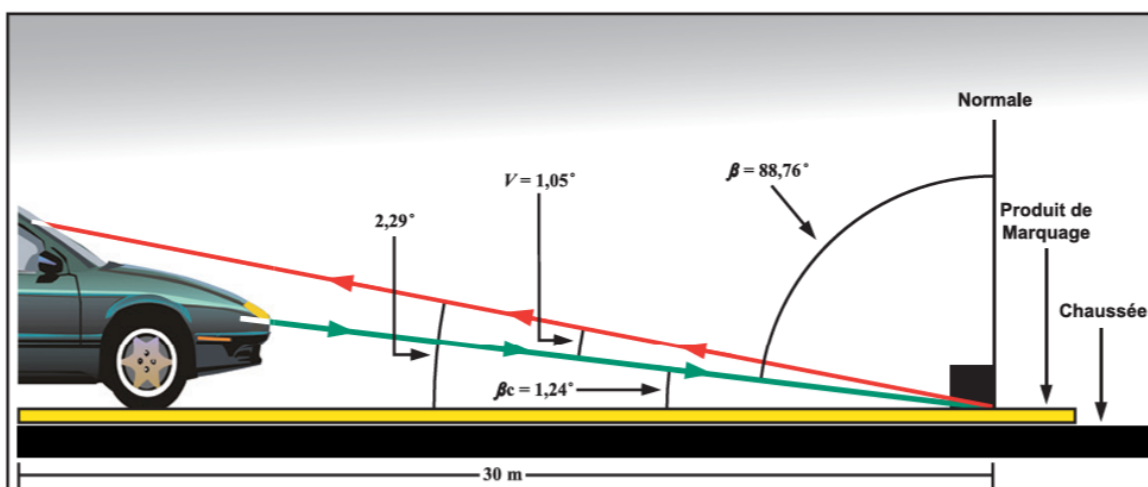


Figura 11 Ángulos-geometría de reflexión

Aspectos importantes de la microesfera

En Costa Rica la microesfera debe cumplir con la norma INTEQ45-1 (INTECO, 2021)

Las microesferas de vidrio deben ser esféricas, tener una superficie lisa y brillante no tener aspecto blanquecino, fracturas e inclusiones excesivas de gas.

Índice refractario

El índice refractario de las microesferas debe ser al menos 1,50 para permitir que la desviación de la luz en contacto con las microesferas de vidrio sea óptima.

Nivel de penetración

Para obtener un retorno de luz óptimo, el nivel de penetración de las microesferas en la pintura es extremadamente importante. Lo ideal es que las microesferas estén enterradas entre un 40 % y un 60 % en la pintura, figura 12. Si la microesfera queda afuera de la pintura (60% de su superficie fuera de la pintura), figura 13 o por el otro extremo si la esfera queda sumergida más del 60% de su superficie, figura 14, en ambas ocasiones la microesfera no refracta (Boily & Tremblay, 2014, pág. 2)

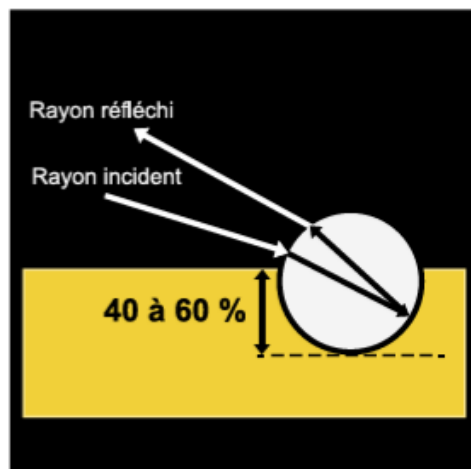


Figura 12 Profundidad adecuada para la reflexión de la microesfera

Fuente: Guide sur la retrorreflexion du marquage routinier, Principes et évaluation (Boily & Tremblay, 2014, pág. 17)

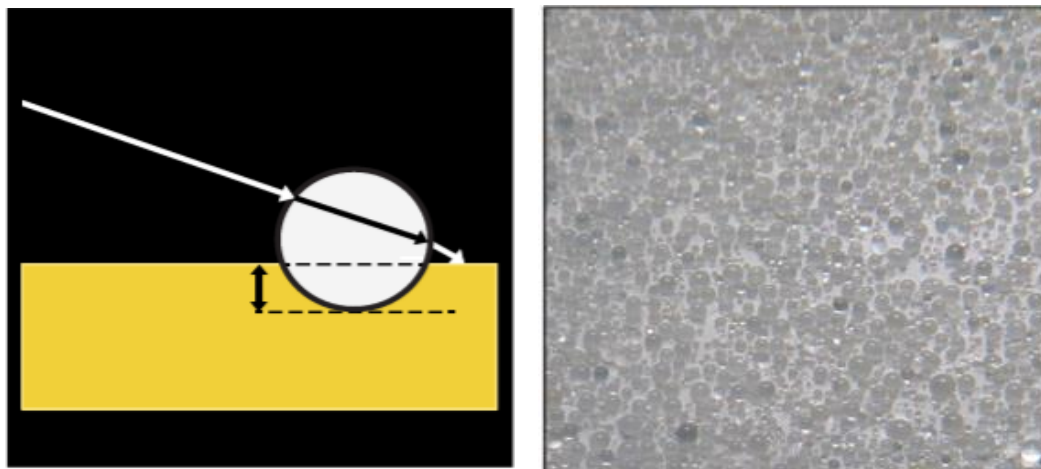


Figura 13 Microesfera con más del 60% de superficie expuesta sobre la pintura

Fuente: Guide sur la retroreflexion du marquage routinier, Principes et évaluation (Boily & Tremblay, 2014, pág. 17)

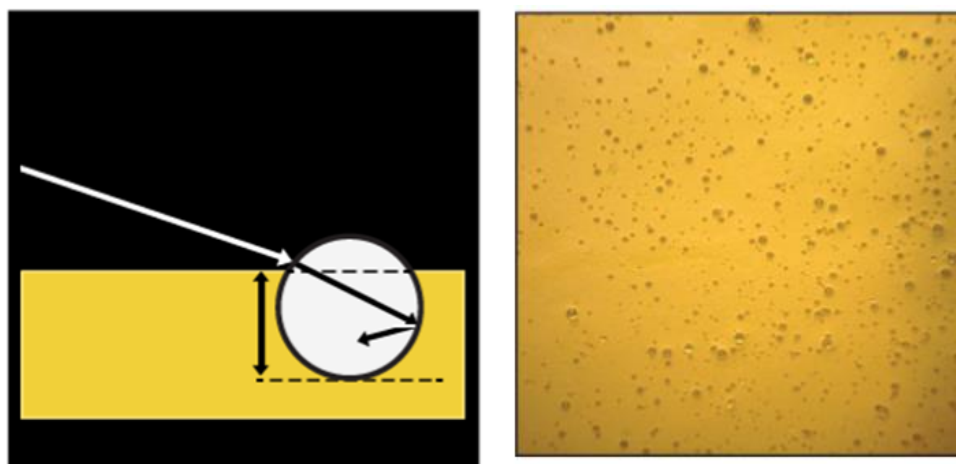


Figura 14 Microesfera con mas del 60% de superficie dentro de la pintura

Fuente: Guide sur la retroreflexion du marquage routinier, Principes et évaluation (Boily & Tremblay, 2014, pág. 17)

Selección de microesferas de vidrio según el tipo de material de demarcación

La elección del tipo y granulometría de las microesferas de vidrio a emplear en trabajos de demarcación vial debe realizarse en función del tipo de pintura o material termoplástico utilizado, considerando principalmente su viscosidad, espesor de aplicación y tiempo de curado o secado.

En sistemas de demarcación con películas delgadas, como pinturas base solvente o base agua aplicadas en espesores típicos de $0,41 \text{ mm} \pm 0,04 \text{ mm}$ (pintura húmeda), se recomienda el uso de microesferas de vidrio de menor diámetro (tipos I o II según norma INTE Q-46). Estas esferas ligeras se integran eficientemente a la película delgada, garantizando su anclaje sin generar sobresalientes que comprometan la retroreflectividad ni el desgaste prematuro.

Por el contrario, en materiales de aplicación en caliente o extruidos, como los termoplásticos o pinturas epóxicas de alto espesor, cuya película puede superar los 2 mm, es adecuado utilizar

microesferas de mayor granulometría (tipos II y III). Este mayor tamaño permite que las esferas se anclen adecuadamente en la membrana espesa, manteniendo su correcta orientación y exposición para reflejar la luz incidente de los faros vehiculares durante la noche o en condiciones de baja visibilidad.

Tabla 5 Contenido de microesferas por tipo de pintura

Tipo de pintura	Tipo de microesfera	Cantidad de esferas kg/m ²	
		Integradas (premezcladas)	Gravedad (Drop-On) kg/m ²
Base solvente	Tipo 1 o Tipo 2	-	0,30 ± 0,02
Base agua tipo II	Tipo 1 o Tipo 2	-	0,30 ± 0,02
Base agua tipo III	Tipo 1 o Tipo 2	-	0,30 ± 0,02
Termoplástico	Tipo 1, Tipo 2 o Tipo 3	Según fabricante o proveedor	0,40 ± 0,02
1) El tamizado de las microesferas de vidrio se establecen en la norma INTE Q45. (Ver nota 8)			

Fuente: (INTECO, 2021, pág. 14)

En la tabla anterior se indica la utilización de únicamente 3 tipos de granulometría.

Medición de retroreflectividad

Según la indicación de la norma INT Q46 se debe medir retroreflectividad entre los 7 y 14 días posteriores a la demarcación. Los parámetros aceptables para pinturas base solvente, base agua y termoplástica se indican en la tabla siguiente:

Tabla 6 Rangos de retroreflectividad iniciales.

Tipo de demarcación	Color	
	Blanca ^A mcd/luix/m ²	Amarilla ^A mcd/lux/m ²
Base Agua	dd	200
Base Solvente	250	200
Termoplástico	300	250
^A Estos datos corresponden a valores correspondientes a R _L (visibilidad nocturna), simulados por el equipo y sobre superficie seca.		

Fuente: Norma INTECO Q46

La norma costarricense INTECO Q46 reza lo siguiente respecto a la retroreflectividad:

“La demarcación debe cumplir con los valores de retroreflectividad mínima establecidos en la Tabla 3 en condiciones secas (visibilidad nocturna). Para la evaluación de la retroreflectividad de la demarcación vial horizontal en campo, se podrá utilizar tanto equipo manual como equipo móvil, los cuales deben cumplir con la geometría estándar según la norma ASTM E1710. Ambos equipos deben medir la visibilidad nocturna R_L, y opcionalmente la visibilidad diurna QD. El equipo móvil

únicamente se debe utilizar para líneas, por lo que en el caso de figuras y letreros, se debe utilizar equipo manual.” (INTECO, 2021)

Comportamiento de la retroreflectividad con el paso de vehículos.

Para la evaluación de la retroreflectividad en Costa Rica y su comportamiento ante el tránsito, el ingeniero Marco Vinicio Zamora Coto elaboró la tesis de investigación titulada *Evaluación de la retroreflectividad y el desgaste de la demarcación vial horizontal: Estudio en carretera y con el simulador de vehículo pesado (HVS)* (2016). En esta investigación, sometió los dos tipos de material y pintura más frecuentes en el país (termoplástica y base solvente) al desgaste acelerado utilizando el equipo HVS.

Equipo HVS: es una máquina utilizada para simular las cargas y el desgaste que los vehículos pesados aplican sobre las carreteras. Su función principal es evaluar el desempeño y la durabilidad de pavimentos y materiales de construcción vial bajo condiciones controladas y repetitivas.

El ensayo consistió en aplicar un determinado número de repeticiones de carga dinámica a cada línea y registrar los valores de retroreflectividad obtenidos. La carga utilizada fue de cuatro toneladas, se aplicó a una velocidad aproximada de 10 km/h

A partir de la investigación realizada el ingeniero Zamora Rojas se obtienen las siguientes conclusiones:

- La pintura base solvente y el material termoplástico desarrollan un aumento inicial de retroreflectividad luego de su demarcación, sin embargo, el material termoplástico es el que presenta un incremento mayor. (Zamora Coto, 2016)
- En el ensayo utilizando el HVS, el material termoplástico tuvo el mejor desempeño desde el punto de vista pérdida de retroreflectividad a través del tiempo en comparación con la pintura base solvente, específicamente el color amarillo, sin embargo, desde el punto de vista de condiciones iniciales, el termoplástico fue el más deficiente, particularmente el color amarillo. (Zamora Coto, 2016)

2.1.9 Inspección y análisis visual de demarcaciones viales

La evaluación visual constituye una herramienta fundamental para valorar de manera preliminar la calidad y el desempeño de los materiales utilizados en demarcación vial horizontal. Mediante inspecciones visuales sistemáticas es posible identificar características físicas relevantes de las marcas viales, tales como:

- **Cantidad de desprendimiento:**
 - Una característica fundamental en la demarcación vial horizontal es la capacidad de las pinturas de mantenerse adheridas a la superficie del pavimento, asegurando su funcionalidad a lo largo del tiempo. Esta adherencia está directamente influenciada por diversos factores, como el tipo de material del pavimento, las condiciones climáticas, la calidad de aplicación de la pintura y, especialmente, la fricción generada por el contacto continuo con los neumáticos de los vehículos.
- **Ventajas y desventajas:**
 - Se evalúan las ventajas de cada material en términos de aplicación, apariencia y durabilidad inicial.

- Se identifican defectos como fisuras, desprendimientos, decoloración, irregularidades en la aplicación y otros signos de deterioro prematuro.
- **Comportamiento ante condiciones diversas:**
 - Se observa cómo cada material responde a factores ambientales como la exposición a la radiación UV, la humedad, los cambios de temperatura y la abrasión por el tráfico.
- **Características físicas:**
 - Se evalúa la uniformidad de la capa de demarcación, la nitidez de los bordes, la textura superficial y la adherencia al pavimento.
 - Se observa la presencia de microesferas de vidrio y su distribución, lo que influye en la retroreflectividad.
- **Análisis Comparativo:**
 - La evaluación visual permite comparar el desempeño de los diferentes materiales en condiciones similares, lo que facilita la selección del material más adecuado para cada aplicación.
 - Se puede realizar una documentación fotográfica para tener un registro que permita evaluar el paso del tiempo en los diferentes materiales.
- **Comportamiento en carpetas asfálticas deterioradas:**
 - La evaluación visual permite analizar cómo se comporta cada tipo de demarcación en áreas con deterioro de la carpeta asfáltica, como el "cuero de lagarto" (fisuración por fatiga) y el desprendimiento de finos (pérdida de agregados). Esto es crucial para determinar la idoneidad de cada material en condiciones adversas.

La evaluación visual se complementa con ensayos de laboratorio y mediciones de retroreflectividad para obtener una evaluación integral del desempeño de las demarcaciones viales, proporcionando datos objetivos y cuantificables que respaldan las observaciones visuales.

2.1.9.1 Evaluación de la Adherencia de la Demarcación

La evaluación de la adherencia de la demarcación vial a la superficie del pavimento es un parámetro que determinar su durabilidad y desempeño a largo plazo. Uno de los métodos de evaluación visual aplicables consiste en la identificación de la cantidad de pintura remanente en la superficie, lo que indirectamente indica la cantidad de adherencia inicial y la resistencia al desprendimiento.

La norma ASTM D913, Método de prueba estándar para evaluar el grado de resistencia de la pintura de tráfico a la abrasión, la erosión o una combinación de ambas, en pruebas de servicio en carretera (Standard Test Method for Evaluating Degree of Resistance of Traffic Paint to Abrasion, Erosion, or a Combination of Both, in Road Service Tests), proporciona un conjunto de imágenes de referencia que representan diferentes porcentajes de pintura adherida a la superficie asfáltica. Estas imágenes permiten realizar una comparación visual directa con la demarcación evaluada, asignando un valor numérico o una descripción cuantitativa de la cantidad de adherencia. (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM). (s.f.). ASTM, 2020)

El procedimiento de evaluación visual basado en la norma ASTM D913 implica los siguientes pasos:

1. **Inspección visual:** Se realiza una inspección detallada de la demarcación, observando el porcentaje de área cubierta con demarcación.
2. **Comparación con las imágenes de referencia:** Se compara la apariencia de la demarcación con las imágenes de la norma ASTM D913, identificando la imagen que mejor representa las condiciones de la demarcación.

3. **Asignación de un valor:** Se asigna un valor numérico relacionado a la cantidad de demarcación adherida o la cantidad de área cubierta con demarcación, según la escala de la norma ASTM D913.
4. **Registro de resultados:** Se registran los resultados de la evaluación, incluyendo la ubicación de la demarcación, el tipo de pintura y el porcentaje de área cubierta con demarcación.

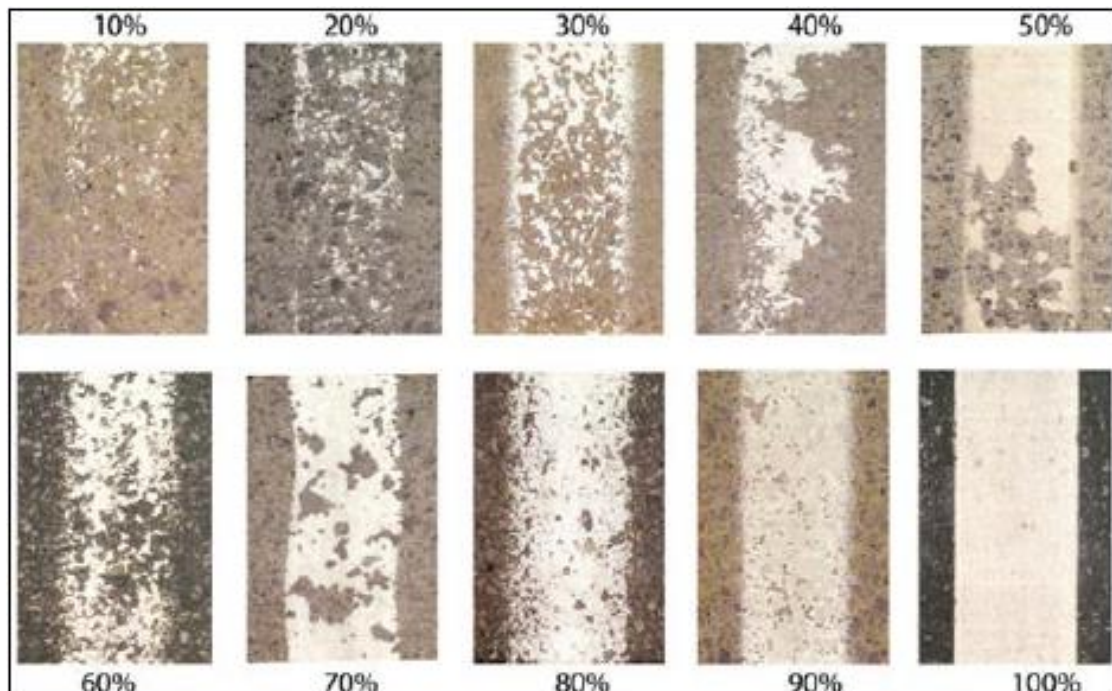


Figura 15 Porcentaje relativo del pavimento cubierto con material de demarcación
Fuente: ASTM, 2015

2.1.10 Resistencia al deslizamiento en demarcaciones viales horizontales

La resistencia al deslizamiento es una propiedad que debe ser considerada en la evaluación del desempeño de las demarcaciones viales horizontales, especialmente bajo condiciones húmedas. Una superficie con bajo coeficiente de fricción representa un riesgo considerable para la seguridad vial, particularmente en zonas críticas como cruces peatonales, áreas de frenado, curvas e intersecciones.

Una de las técnicas para medir esta propiedad es el ensayo con el Péndulo Británico (British Pendulum Tester), regulado por la norma ASTM E303 – Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester, (*Método estándar para medir la propiedad de fricción usando el péndulo británico*). Este método permite determinar de forma indirecta el coeficiente de fricción de una superficie pintada, simulando el deslizamiento de un neumático sobre pavimento mojado. (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM)).

El principio de funcionamiento del equipo se basa en la pérdida de energía cinética de un péndulo articulado que, al oscilar, entra en contacto con la superficie de prueba mediante una zapata de caucho estandarizada. La energía disipada por fricción durante este contacto se traduce a una lectura en una escala graduada, conocida como Número del Péndulo Británico (BPN). A mayor valor de BPN, mayor es la fricción de la superficie, lo que implica una menor probabilidad de derrape o pérdida de adherencia por parte de un vehículo.

Para garantizar la confiabilidad de los resultados, el ensayo debe realizarse bajo condiciones controladas de humedad y temperatura, ya que estas variables influyen significativamente en la adherencia superficial. Asimismo, la zapata de caucho debe mantenerse en condiciones óptimas, sin endurecimiento, desgaste anormal ni contaminantes, en cumplimiento con los lineamientos de calibración establecidos por la norma. (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM)).

La evaluación de la fricción en las demarcaciones viales es importante no solo para verificar el cumplimiento de los requisitos ópticos, como la retroreflectancia, el color y la visibilidad en distintas condiciones de iluminación, sino también para asegurar el cumplimiento de criterios de seguridad funcional, principalmente en climas húmedos como el de Costa Rica, donde el pavimento permanece mojado durante gran parte del año. En estas condiciones, mantener niveles adecuados de fricción contribuye directamente a la prevención de accidentes asociados al deslizamiento, el frenado deficiente o la pérdida de control de los vehículos en especial de motocicletas.

Aunque muchos productos para demarcación vial mantienen un desempeño relativamente estable entre diferentes lotes de producción, es imprescindible que todo producto nuevo introducido al mercado nacional sea sometido a ensayos de fricción antes de su aplicación en la red vial. Esta práctica reduce los riesgos operacionales y permite tomar decisiones informadas sobre la idoneidad del material.

La propiedad de resistencia al deslizamiento debe ser evaluada no solo en sistemas de pintura para demarcación, sino también en diversos materiales y tratamientos aplicados sobre la infraestructura vial, tales como:

- **Sellos asfálticos**, empleados para extender la vida útil de las carpetas asfálticas.
- **Ligantes para el sellado de grietas** en pavimentos de concreto hidráulico o mezcla asfáltica.
- **Nuevos diseños de mezcla asfáltica**, especialmente cuando se utilizan polímeros, materiales reciclados u otras formulaciones innovadoras.

La pintura plástica en frío, al tratarse de un producto de reciente introducción en Costa Rica, sobre el cual aún no se cuenta con datos técnicos locales suficientes, resulta prioritario realizar ensayos de fricción que verifiquen su seguridad antes de una implementación masiva. Este análisis permitirá establecer lineamientos nacionales de aceptación y asegurar que su aplicación no incremente el riesgo de siniestros en la red vial costarricense.



Figura 16 Péndulo británico, herramienta para medir fricción de superficies

Fuente: Propia

En Costa Rica no se encuentran definidos de manera específica los parámetros normativos que deben cumplir las demarcaciones viales en cuanto a resistencia al deslizamiento. No obstante, en otros países se han establecido criterios técnicos claros respecto a este aspecto, como es el caso de Nueva Zelanda.

En el documento técnico titulado *Skid Resistance and Pavement Marking Materials* (Resistencia al deslizamiento y materiales para demarcación vial), se indica que las demarcaciones deben cumplir con los siguientes valores mínimos de fricción:

- Un valor de 45 BPN o más para demarcaciones con un espesor de película seca inferior a 0,9 mm, como es el caso de la pintura convencional.
- Un valor mayor que 50 BPN pero inferior a 65 BPN para demarcaciones con un espesor de película seca igual o superior a 0,9 mm, como sucede con los materiales termoplásticos o de alta durabilidad.

Estos rangos establecidos en la normativa neozelandesa permiten contextualizar y valorar el desempeño de los materiales utilizados en demarcación vial, particularmente en lo que refiere a la seguridad en condiciones de fricción reducida. La ausencia de lineamientos específicos en Costa Rica resalta la necesidad de generar evidencia técnica local que sirva de base para futuras normativas o actualizaciones de los estándares vigentes. (The NZ Roadmarkers Federation Inc , Alister Harlow)

En su investigación del 2005, Alister Harlow identifica diversos factores que afectan la resistencia al deslizamiento de la señalización vial. Destaca que la textura superficial del pavimento influye significativamente en marcas de película delgada, mientras que su efecto es menor en sistemas de mayor espesor. Propone niveles mínimos de fricción de 45 BPN en zonas peatonales y marcas transversales, y 40 BPN en marcas longitudinales, priorizando la retrorreflectividad nocturna húmeda. Además, señala que la diferencias en el grado de fricción entre la demarcación y el pavimento pueden representar un riesgo para usuarios, como ciclistas y motociclistas. (Harlow, 2005)

2.1.11 Paño de prueba

Para el proyecto de investigación se considera un paño de prueba como una sección específica y controlada de una obra vial destinada a la realización de pruebas y ensayos. Su propósito principal es evaluar y validar la calidad de los materiales, técnicas de construcción y procedimientos propuestos antes de la implementación a gran escala del un producto. Esta área piloto permite verificar el cumplimiento de las especificaciones técnicas, normativas y estándares de calidad establecidos, identificando y corrigiendo posibles deficiencias o ajustes necesarios en el diseño y ejecución, en este caso específico el paño de prueba es funcional para conocer el comportamiento de la pintura plástico en frío y también compararla con otros tipos de demarcación. El uso de un paño de prueba es fundamental para asegurar la integridad y durabilidad de la infraestructura final, así como para optimizar el cumplimiento.

2.1.12 Análisis estadístico de la variabilidad de la desviación mediante ANOVA

El análisis estadístico de la variabilidad de la desviación tiene como finalidad evaluar el grado de dispersión o variación que presentan los datos dentro de un conjunto de mediciones, permitiendo identificar la consistencia y homogeneidad de los resultados obtenidos. En el ámbito de la ingeniería civil y, específicamente, en estudios de desempeño de materiales, esta herramienta resulta fundamental para determinar si las diferencias observadas entre grupos de datos (por ejemplo, distintos tipos de pintura para demarcación vial) son estadísticamente significativas o atribuibles al azar.

Una de las técnicas más utilizadas para este tipo de análisis es el Análisis de Varianza (ANOVA). Este método estadístico permite comparar las medias de dos o más grupos independientes con el

propósito de establecer si existen diferencias significativas entre ellos, basándose en la variación interna (intra-grupo) y externa (entre grupos) de los datos. El ANOVA evalúa si la variabilidad total observada puede explicarse por el efecto del factor estudiado (en este caso, el tipo de material), o si las diferencias entre las medias son producto del error aleatorio.

Las principales variables que intervienen en el análisis ANOVA son:

- **Promedio de los grupos ($\bar{x}$):** Representa el valor promedio de cada grupo o tratamiento evaluado.
- **Valor F (estadístico F de Fisher):** Es el cociente entre la varianza entre grupos y la varianza dentro de los grupos. Un valor elevado de F sugiere que las diferencias entre las medias son significativas.
- **Valor p (p-value):** Indica el nivel de significancia estadística.
 - Si el p-valor es menor que el nivel de significancia establecido (generalmente $\alpha = 0.05$), se rechaza la hipótesis nula, lo que sugiere que al menos una media es significativamente diferente.
 - Si el p-valor es mayor que α , no se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que no hay evidencia estadística suficiente para afirmar diferencias
- **F Crítico:** El valor F crítico (o F crítico de Fisher) es el umbral numérico que se obtiene a partir de la distribución F para un determinado nivel de significancia (α), considerando los grados de libertad entre grupos y dentro de los grupos. Este valor representa el punto de corte que se utiliza para decidir si el estadístico F calculado (F observado) es suficientemente grande como para rechazar la hipótesis nula.
 - Si $F_{\text{observado}} > F_{\text{crítico}}$, se rechaza la hipótesis nula, lo que implica que las diferencias entre los grupos son estadísticamente significativas.
 - Si $F_{\text{observado}} \leq F_{\text{crítico}}$, no se rechaza la hipótesis nula.

El F crítico permite establecer un criterio de comparación con el estadístico F calculado y se puede obtener a partir de tablas de distribución F o mediante software estadístico como Excel.

Relación entre F crítico y p-valor

Ambos valores cumplen la misma función: decidir si hay diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los grupos. Mientras el p-valor proporciona una medida de la evidencia contra la hipótesis nula, el F crítico ofrece un punto de referencia para comparar con el estadístico F. En general:

- Si $F_{\text{observado}} > F_{\text{crítico}} \rightarrow p\text{-valor} < \alpha \rightarrow$ Se rechaza H_0 .
- Si $F_{\text{observado}} < F_{\text{crítico}} \rightarrow p\text{-valor} > \alpha \rightarrow$ No se rechaza H_0 .

En el marco de esta investigación, el análisis estadístico de la variabilidad mediante ANOVA (Análisis de Varianza) se utiliza como herramienta fundamental para evaluar si existen diferencias estadísticamente significativas en el comportamiento de tres tipos de materiales de demarcación vial horizontal: pintura base solvente, pintura plástica en frío y material termoplástico. Las propiedades evaluadas incluyen **retroreflectividad**, **resistencia al desprendimiento** y **resistencia al deslizamiento (fricción superficial)**. Este análisis permite determinar si las variaciones observadas en los resultados de estas propiedades pueden atribuirse al tipo de material empleado o si son producto del azar.

El ANOVA facilita la comparación de las medias de los valores obtenidos en cada grupo (tipo de pintura) y analiza si las diferencias entre estas medias son significativas desde el punto de vista estadístico. (Montgomery, 2020)

Variables principales del análisis ANOVA

- **Promedio de los grupos ($\bar{x}$):** Representa el valor medio de cada grupo experimental (tipo de pintura) para cada una de las propiedades estudiadas.
- **Estadístico F de Fisher (F observado):** Es el cociente entre la varianza entre los grupos y la varianza dentro de los grupos. Un valor elevado de F sugiere diferencias significativas entre los grupos.
- **Valor p (p-value):** Indica el nivel de evidencia contra la hipótesis nula. Si el p-valor es menor que el nivel de significancia predefinido ($\alpha = 0.05$), se rechaza la hipótesis nula.
- **F crítico:** Es el umbral de comparación que se obtiene de la tabla de distribución F, en función de los grados de libertad y el nivel de significancia. Sirve como punto de referencia para evaluar si el valor F observado permite rechazar o no la hipótesis nula. (Triola, 2018)

Estos parámetros estadísticos son calculados utilizando software especializado (como Microsoft Excel o herramientas estadísticas en línea) y permitirán sustentar las decisiones sobre el comportamiento diferencial entre los materiales evaluados.

Aplicación específica en esta investigación

El ANOVA se aplica de manera independiente para cada una de las propiedades medidas: retrorreflectividad, resistencia al desprendimiento y fricción superficial. Para cada variable, se plantean las siguientes hipótesis:

- **1. Retrorreflectividad**
 - **Hipótesis nula (H_0):** No existen diferencias significativas en los valores promedio de retrorreflectividad entre los tres tipos de pintura evaluados.
 - **Hipótesis alternativa (H_1):** Al menos uno de los tipos de pintura presenta una retrorreflectividad significativamente diferente respecto a los otros.
- **2. Desprendimiento**
 - **Hipótesis nula (H_0):** No existen diferencias significativas en el grado de desprendimiento entre los tres tipos de pintura para demarcación.
 - **Hipótesis alternativa (H_1):** Al menos uno de los materiales presenta un comportamiento significativamente diferente en cuanto al desprendimiento.
- **3. Fricción superficial (resistencia al deslizamiento)**
 - **Hipótesis nula (H_0):** No existen diferencias significativas en los valores promedio de fricción superficial entre los materiales demarcadores.
 - **Hipótesis alternativa (H_1):** Al menos uno de los materiales presenta una resistencia al deslizamiento significativamente distinta a la de los otros.

Relación entre F crítico y p-valor

Tanto el **F crítico** como el **p-valor** se utilizan para tomar decisiones sobre la validez de la hipótesis nula. Mientras que el p-valor ofrece una medida directa del nivel de significancia, el F crítico permite establecer un criterio de comparación numérica con el F observado. En este análisis:

- Si **F observado** > **F crítico** → **p-valor** < α (0.05) → Se **rechaza** la hipótesis nula → Existen diferencias significativas.
- Si **F observado** ≤ **F crítico** → **p-valor** ≥ α → No se rechaza la hipótesis nula → No existen diferencias significativas.

Este enfoque permitirá identificar si los materiales presentan desempeños estadísticamente distintos, y en consecuencia, establecer criterios técnicos más fundamentados para la selección del tipo de pintura más adecuado según cada propiedad evaluada.

CAPÍTULO 3: MARCO METODOLOGICO

En este capítulo se presenta las fuentes de información, tiempo de investigación, muestra, población y los pasos a seguir para lograr cada objetivo específico planteado para esta investigación.

Previo al inicio de la investigación teórica y experimental es importante describir esta investigación, su enfoque y población

1. Enfoque de la Investigación La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, cualitativo y experimental, dado que se evalúa el desempeño de distintos materiales de demarcación vial en condiciones reales de servicio. Se realizarán mediciones de variables clave como la retroreflectividad, adherencia, durabilidad y seguridad de la demarcación, con el objetivo de comparar el desempeño de la pintura plástica en frío frente a la pintura base solvente y el material termoplástico.

2. Tipo de Investigación

El estudio es de tipo experimental y comparativo, ya que implica la aplicación de distintos materiales de la demarcación vial en paños de prueba y el posterior análisis de su desempeño a lo largo del tiempo. Se busca establecer relaciones causales entre las propiedades de los materiales y su comportamiento en la infraestructura vial

4. Población y Muestra. La población de estudio está constituida por tres tipos de materiales para demarcación vial empleados en Costa Rica. La muestra corresponde a cuatro paños de prueba ubicados en el cantón de Aserrí, en los cuales se han aplicado tres tipos de pintura:

- Material termoplástico
- Pintura plástica en frío
- Pintura base solvente

Se presenta un diagrama del proceso de la investigación que guía al lector hacia los resultados y análisis de datos desde la fase 1 (investigación teórica) hasta la fase 4 (análisis de datos).

En la figura siguiente se muestra el diagrama de procesos de esta investigación

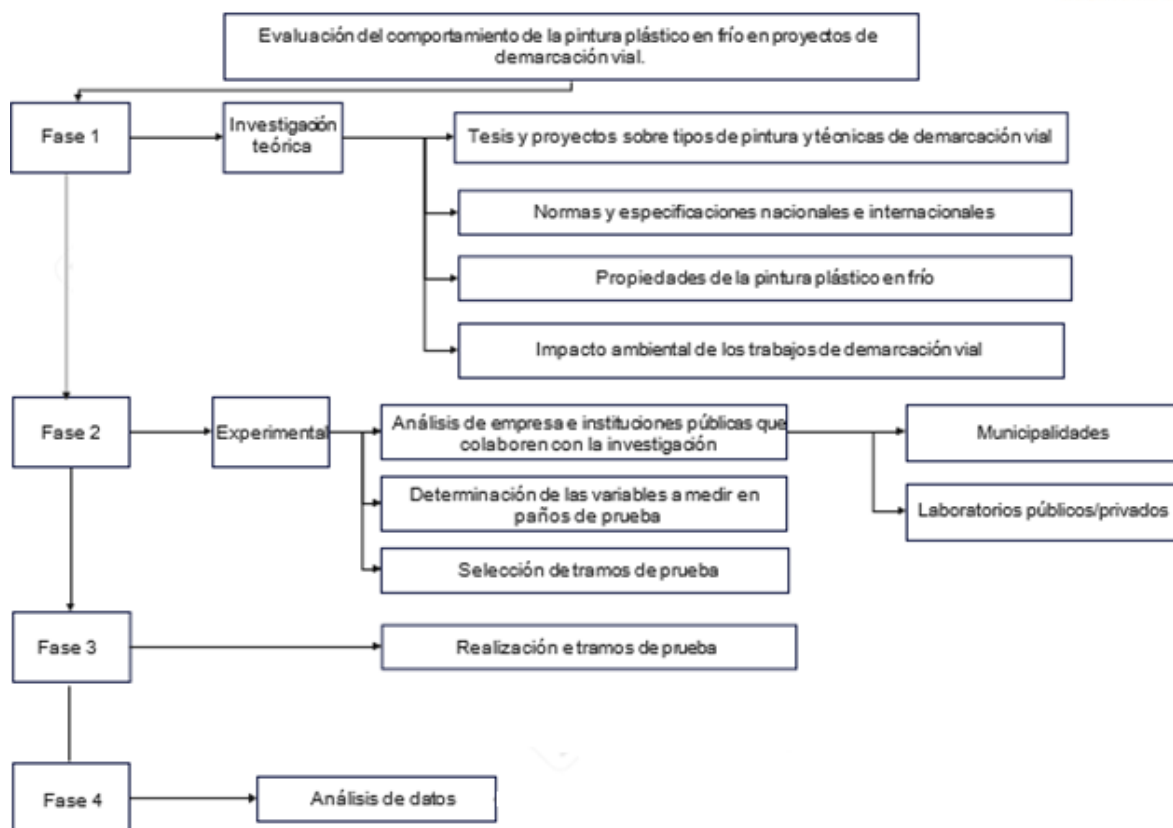


Figura 17 Diagrama de proceso de investigación

A continuación se describe cada una de las fases

3.1 Fase 1. Investigación Teórica

La primera fase metodológica de esta investigación corresponde a la investigación teórica. En esta etapa se recopila, analiza y sistematiza información técnica clave relacionada con los materiales de demarcación vial, en particular la pintura plástica en frío. Su importancia radica en que permite establecer una base de conocimiento sólida sobre las propiedades, ventajas y limitaciones teóricas de este tipo de pintura, así como las normativas nacionales e internacionales que regulan su uso y aplicación en infraestructura vial.

Además, la investigación teórica proporciona las directrices necesarias para la correcta elaboración de los paños de prueba, al instruir sobre aspectos técnicos fundamentales como los métodos de aplicación, espesores recomendados, tiempos de secado, condiciones de ensayo y criterios de aceptación. De igual manera, facilita la comprensión de los factores que inciden en el desempeño y durabilidad de las demarcaciones viales, elementos esenciales para el posterior análisis experimental.

Cabe destacar que la investigación teórica no solo apoya el desarrollo del componente experimental, sino que también constituye la principal herramienta para abordar los objetivos relacionados con la estudio de precios de las demarcaciones por metro y el impacto ambiental de las demarcaciones. En el caso del análisis de precios de las demarcaciones, fue necesario recopilar información actualizada sobre los precios ofertados de diferentes soluciones de demarcación.

En conjunto, esta fase teórica aporta el conocimiento técnico indispensable para sustentar el estudio, diseñar adecuadamente los procedimientos experimentales y orientar el análisis de resultados desde una perspectiva normativa, económica y ambiental.

Para enriquecer el marco conceptual y garantizar la confiabilidad de la información obtenida, se consultaron diversas fuentes documentales, clasificadas en fuentes primarias y secundarias.

3.1.1 Fuentes de Información

Las fuentes utilizadas para la extracción de información requerida para el análisis y realización de la investigación son:

- **Fuentes primarias**

Las fuentes de donde se extrajo la información más importante e indispensable para la investigación son las siguientes:

- Normativa costarricense para trabajos de demarcación vial: INTE Q46ENM1 (espesores de termoplástico), INTE Q46ENM1 (espesores de la pintura solvente y Termoplástico)
- Normativa internacional referentes a materiales, pinturas y procesos para demarcación vial, entre ellas: ASTM D-4451 (contenido de pigmento a cada pintura y al material termoplástico), ASTM D-711 (Tiempo de No levantamiento No Pick- Up Time), ASTM D 562 (Método de prueba estándar para la consistencia de las pinturas medición de la viscosidad KU), ASTM D4414 (espesores de la pintura solvente y plástico en frío), ASTM D913 (desprendimiento de demarcación), NTC1360 (norma colombiana para plástico en frío).
- Investigación de precios en la plataforma SICOP
- Especificaciones técnicas de los materiales y pinturas para demarcación vial a nivel regional.
- Artículos publicados en páginas oficiales de industrias de la demarcación vial
- Artículos e investigaciones de impacto ambiental de las demarcaciones: The green choice of road marking systems, Sustainability assessment of road marking systems
- Guías para la aplicación de pinturas y materiales para demarcación vial.

- **Fuentes secundarias**

Otras fuentes de información requeridas colateralmente para fundamentar la investigación son las siguientes:

- Trabajos de graduación con temas relacionados a demarcación vial, adherencia entre pinturas de demarcación vial entre otros.
- Investigaciones realizadas por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica
- Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puente
- Literatura relacionada al tema de materiales de demarcación vial

3.2 Fase 2 Experimental

3.2.1 Investigación de instituciones y empresas colaboradoras

Como parte del proceso metodológico, se llevó a cabo una investigación orientada a identificar instituciones y empresas que pudieran contribuir al desarrollo del componente experimental del estudio, específicamente en lo relacionado con la aplicación de la pintura plástico en frío, base solvente y material termoplástico sobre la red vial.

En primera instancia, se realizó un análisis de las instituciones públicas que contaban con contrataciones activas para demarcación vial, con el objetivo de coordinar la demarcación de los paños de prueba. Como resultado de este estudio, se identificó que la Municipalidad de Aserri disponía de un contrato vigente en labores de demarcación, lo cual permitió gestionar y concretar la ejecución de los paños de prueba bajo condiciones operativas reales.

Paralelamente, se investigó a nivel nacional el panorama empresarial relacionado con la aplicación de pintura plástica en frío. Se localizaron dos empresas, con las cuales se estableció contacto directo. A una de estas empresas se le presentó el enfoque y relevancia técnica de la presente investigación, logrando una respuesta positiva y disposición para colaborar con la fase experimental del proyecto. La participación de dicha empresa fue clave para asegurar una aplicación profesional del material, cumpliendo con las condiciones técnicas necesarias para garantizar la validez de los ensayos y mediciones posteriores.

3.2.2 Determinación de variables a medir en los paños de prueba

Como resultado de la Fase 1 de esta metodología: *investigación teórica*, se identificaron las principales variables que permitieron evaluar de forma objetiva la calidad y el rendimiento de las demarcaciones viales y que fueran funcionales para compararse entre los tres tipos de demarcaciones. Estas variables fueron seleccionadas con base en criterios técnicos, normativos y prácticos, considerando tanto el desempeño funcional como las condiciones de aplicación en campo.

Las variables seleccionadas fueron: retrorreflectividad, Resistencia al desprendimiento / adherencia, factor deslizante (coeficiente de fricción).

1. **Retroreflectividad:** Se midió a cada material la retroreflectividad y la capacidad para mantener sus propiedades reflectantes a lo largo del tiempo, utilizando un retrorreflectómetro para cuantificar la intensidad luminosa reflejada.
2. **Resistencia al desprendimiento / adherencia:** La evaluación de la adherencia de las pinturas y el material termoplástico se llevó a cabo mediante inspección visual y análisis de imágenes de referencia, conforme a la norma ASTM D913. Esta metodología permitió cuantificar el porcentaje de pintura adherida a la superficie asfáltica, utilizando una serie de imágenes estandarizadas que representan distintos niveles de desprendimiento. Con esta información, se determinó la durabilidad del material y su desempeño ante las condiciones operativas de la vía.
3. **Factor deslizante (coeficiente de fricción):** Para evaluar la seguridad de las tres demarcaciones viales, se determinó el coeficiente de fricción mediante el ensayo del péndulo británico. Este procedimiento permitió cuantificar el factor de deslizamiento de cada demarcación, lo que facilitará la identificación de la opción más segura para los usuarios de la vía.

Adicionalmente, durante el proceso de aplicación de los paños de prueba, se realizaron observaciones cualitativas con el fin de complementar la evaluación técnica. Entre los aspectos observados se incluyeron: presencia de emanaciones o contaminación perceptible, peligrosidad y practicidad de aplicación

3.2.3 Selección de los tramos para prueba

La selección de los tramos de prueba fue un proceso clave en la planificación experimental, ya que debían ser funcionales y adecuados para analizar las variables definidas en la Fase 1.

Cada paño de prueba debía asegurar una serie de condiciones mínimas para garantizar la validez del análisis. Entre los principales criterios de selección aplicados se encuentran:

Ausencia de escorrentías superficiales o fugas de agua: Se verificó que no existieran descargas de acueducto, fugas de sistemas de alcantarillado pluvial ni acumulaciones de agua que pudieran alterar el comportamiento del material o su adherencia.

Homogeneidad en el estado de la superficie asfáltica: Cada paño de prueba presentó una condición uniforme de carpeta asfáltica en toda su extensión. Aunque entre diferentes paños si hay condiciones distintas (por ejemplo, el paño de Maria Auxiliadora es mas deteriorado que el de Barrio El Socorro), dentro de un mismo paño no se permitió zonas con baches, fisuras, parches recientes o transiciones entre capas de diferente antigüedad o textura.

Ausencia de tránsito de maquinaria pesada o salidas frecuentes de estos vehículos: Se evitó seleccionar tramos que colindaran con instalaciones industriales, talleres, plantas de asfalto o construcciones activas que generaran tránsito constante de maquinaria, lo cual podría dañar o alterar prematuramente la pintura aplicada.

Geometría del tramo favorable: Se descartaron tramos con curvas pronunciadas, intersecciones importantes, pendientes marcadas o cualquier característica geométrica que pudiera influir en la visibilidad, fricción o desgaste diferenciado de la demarcación.

Superficie libre de huecos o deformaciones críticas: Se exigió que los paños estuvieran libres de huecos, depresiones y levantamientos, que pudieran introducir inconsistencias en la aplicación o el análisis del comportamiento del material.

Este proceso riguroso de selección y evaluación permitió definir tramos de prueba representativos, técnicamente consistentes y libres de variables de interferencia, asegurando así la fiabilidad de los resultados obtenidos en las mediciones posteriores.

En total, se seleccionaron tres paños de prueba en los cuales fue posible demarcar líneas laterales, líneas centrales y líneas transversales, y un tramo adicional destinado exclusivamente a la aplicación de la línea divisoria de carriles de color amarillo. Esta estrategia permitió diversificar las condiciones sin comprometer la comparabilidad de los resultados.

Ver imágenes de la sección 4.2 *Evaluación de la condición de los paños de prueba previo a la realización de las demarcaciones* en la que se ilustra las condiciones iniciales de los paños de prueba.

3.2.4 Estudio de precios de demarcación vial para la pintura solvente, plástico en frío y material termoplástico en Costa Rica

Con el propósito de obtener un marco de referencia real sobre la demanda y los precios ofertados para la pintura plástica en frío, solvente y material termoplástico en el contexto de contratación pública costarricense, se consultó el Sistema Integrado de Compras Públicas (SICOP), plataforma web oficial utilizada por las instituciones públicas de Costa Rica para gestionar sus procesos de adquisición de bienes y servicios.

Por medio de internet se accedió a esta plataforma oficial de SICOP. <https://www.sicop.go.cr/>, sin requerir un usuario. En esta página se hace la búsqueda de diferentes formas entre ellas: por Institución Contratante, palabras claves, rango de fechas, número de contratación. Para esta investigación se realizó la búsqueda por palabras claves como: demarcación, plástico en frío y señalización. Una vez se ingresa a un proceso de contratación se procedió a revisar los Términos de Referencia y las ofertas presentadas.

Se logró identificar algunas contrataciones de demarcación con pintura plástico en frío, no obstante, se evidenció como limitante la reducida cantidad de ofertas registradas que contemplan el uso de ese material. Esta condición responde, en gran medida, al hecho de que dicho material representa una innovación relativamente reciente en el mercado nacional, lo cual restringe su adopción por parte de las instituciones públicas.

3.2.5 Aspectos ambientales en los que la pintura plástica en frío podría inferir en el medio ambiente

Como parte del enfoque integral de esta investigación, se contempló la identificación preliminar de los posibles impactos ambientales asociados al uso de la pintura plástica en frío. Para ello, se realizó una revisión exhaustiva de fuentes de información, tal como se estableció en la Fase 1 del presente marco metodológico.

Paralelamente, se realizaron observaciones directas durante el proceso de aplicación de los tres tipos de materiales empleados en los paños de prueba con el objetivo de identificar posible impacto ambiental, tales como percepción visual de humo, percepción de olores fuertes.

3.3 Fase 3 Realización de demarcación en paños de prueba

En esta fase se describe la realización de la demarcación vial en cada paño de prueba con cada material.

3.3.1 Demarcación

La demarcación se llevó a cabo en diferentes fechas que se detallan a continuación:

- Material termoplástico: se demarcó el 31 de julio y el 1 de agosto del 2024
- Pintura base solvente: se demarcó el 03 de agosto del 2024
- Pintura plástico en frío: se demarcó el 12 y 13 de agosto del 2024

Para garantizar la correcta aplicación de los materiales de demarcación vial y minimizar las variables externas, se siguieron los siguientes pasos

- a) **Preparación de la Superficie:** Se realizó una limpieza exhaustiva de la calzada para eliminar polvo, residuos y humedad. En caso de pavimentos con contaminación severa de aceite o suciedad adherida, se emplearán productos desengrasantes y equipos de barrido mecánico.



Figura 18 Preparación de la Superficie, limpieza

- b) **Marcación Previa:** Se hizo el marcaje de referencia con mecates y cintas adhesivas para asegurar la correcta alineación de la demarcación.



Figura 19 Marcación Previa

c) Selección de Equipos de Aplicación:

- Para la pintura plástica en frío y la pintura base solvente, se utilizó máquinas pulverizadoras de alta presión con boquillas calibradas para obtener el espesor requerido.
- En el caso del material termoplástico, se empleó equipos de extrusión en caliente, asegurando un calentamiento homogéneo y aplicación conforme a las especificaciones.

Para los tres equipos utilizados se contó con personal profesional con experiencia para su manipulación, en especial el equipo de aplicación de material termoplástico, el cual expone a los operarios a temperaturas muy altas la cual representa un riesgo a quemaduras graves.



Figura 20 *Equipo de demarcación de pintura base solvente*



Figura 21 *Equipo de demarcación para material termoplástico*



Figura 22 Equipo de demarcación para pintura plástico en frío

d) Control de tránsito:

Se realizó los cierres parciales y totales en los tramos que se demarcaron ya que los vehículos no deben transitar sobre las demarcaciones durante el periodo indicado en las fichas técnicas y normas respectivas, para este fin se debió manejar un plan de control de tránsito, contar con suficiente personal (banderilleros) para la redirección del tránsito y la rotulación respectiva de trabajos en la vía.



Figura 23 Control de tránsito

e) Aplicación de la Demarcación:

- La pintura se aplicó con forme a cada norma respectiva, respetando los espesores definidos en la misma.

- Para el material termoplástico, se verificó que la temperatura de aplicación se mantenga entre los rangos recomendados por el fabricante para evitar defectos de adherencia.



Figura 24 *Demarcación de líneas transversales con material termoplástico*



Figura 25 *Demarcación de línea amarilla con pintura base solvente*



Figura 26 Demarcación de línea borde con pintura plástico en frío

f) Tiempo de Secado

- Se delimitó la zona de aplicación para evitar el paso de vehículos hasta que la demarcación fraguara completamente.
- Se mantuvo el paso cerrado en el tramo demarcado durante 50 minutos.

g) Control de calidad durante la demarcación

Durante la demarcación vial de los diferentes materiales se inspeccionó la correcta aplicación, contaminación ambiental, riesgo durante aplicación, facilidad y agilidad de aplicación. En los siguientes puntos se indican algunos controles aplicados.

- Medición espesores de las pinturas y material termoplástico para verificar su conformidad con las especificaciones establecidas.
- Verificación de la humedad de la superficie antes de la aplicación de los materiales. Para esta verificación se debe realizar el proceso que dicta la norma INTEQ46 que reza:

Colocar un envoltorio de plástico de 30 cm por 30 cm en la superficie del pavimento, usando cinta adhesiva para fijar los bordes. Dejarlo reposar durante unos 15 minutos y luego revisar las gotas de humedad dentro de la superficie del plástico. Si las gotas tienen un diámetro mayor a 0,5 cm, entonces el pavimento tiene exceso de agua. (INTECO, 2021)

- Verificación de la correcta aplicación de la esfera de vidrio.
- Tomad de muestras de los materiales aplicados para su posterior verificación de calidad mediante pruebas de laboratorio.
- Verificación de las condiciones climáticas, limpieza de la superficie, realización de la premarca.
- Verificación de emisión: olores, calor.

- Verificación de la complejidad de la aplicación de la demarcación
- Verificación de los equipos y materiales utilizados.

3.3.2 *Medición de las variables seleccionadas en la Fase 2 para cada uno de los paños de prueba*

Una vez finalizada la demarcación horizontal con cada pintura o material en los paños de prueba, se procedió con la recolección de los datos correspondientes a los parámetros cuantitativos definidos en la **Selección de los tramos**, Fase 2 del presente marco metodológico. Estos parámetros se encuentran directamente vinculados con los objetivos específicos de la investigación, por lo que su correcta medición y análisis resulta fundamental para la validación de los resultados.

A continuación, se detallan los indicadores evaluados, la frecuencia con la que se realizaron las mediciones y las técnicas o equipos empleados en cada caso.

Retroreflectividad:

La retroreflectividad se evaluó de forma diferenciada para cada tipo de pintura y para cada color de línea demarcada, con el fin de garantizar un análisis comparativo riguroso y en apego a la norma INTE Q 46, INTE Q36 e ASTM E1710.

En cada paño de prueba, la retrorreflectividad fue medida de forma independiente para las líneas blancas (laterales) y para la línea central amarilla. Para las líneas blancas, se realizaron cinco mediciones por cada línea, lo que equivale a un total de diez puntos para cada material. En el caso de la línea amarilla central, se efectuaron aproximadamente cinco mediciones en la línea amarilla de cada material. Esta metodología de muestreo fue aplicada de manera uniforme para todos los tipos de pintura incluidos en cada paño de prueba. Se propuso esta frecuencia de mediciones ya que se intenta obtener suficientes datos que generen resultados representativos. Cabe señalar que en la práctica cotidiana para la recepción de trabajos de demarcación la frecuencia de mediciones es por mucho inferior, alcanzando incluso una medición cada kilómetro.

Las mediciones de retrorreflectividad se llevaron a cabo utilizando un equipo calibrado, marca Easylux Retroreflectometer conforme a los estándares vigentes. Las evaluaciones se realizaron en tres momentos específicos: la primera dentro de los primeros siete y quince (7 y 15) días posteriores a la aplicación del material, la segunda a los setenta (70) días, y la tercera a los seis (6) meses, contados a partir de la fecha de demarcación. Esta periodicidad permitió observar la evolución del desempeño de los materiales a lo largo del tiempo y bajo condiciones reales de servicio.



Figura 27 Medición de retroreflectividad el 14 de agosto del 2025, Paños de prueba varios



Figura 28 Medición de retroreflectividad del 27 de agosto del 2024, en paños de prueba varios



Figura 29 Medición de retroreflectividad del 24 de octubre del 2024, en paños de prueba varios



Figura 30 *Medición de retroreflectividad del 24 de febrero del 2025, en paños de prueba varios*

Adherencia, desprendimiento y durabilidad

Para evaluar el nivel de desgaste y la pérdida de adherencia de la pintura, se implementó un procedimiento de medición del área de desprendimiento en las líneas demarcadas. Esta evaluación se llevó a cabo siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ASTM D913, que proporciona un método estandarizado para la inspección y cuantificación del desprendimiento de material en marcas viales. Ver sección 2.1.9.1.

Para estimar el porcentaje del área de demarcación que aún permanecía adherida a la superficie del pavimento, se utilizó la Figura 15 de este documento como herramienta de comparación visual. Dicha figura fue impresa respetando la proporción original de la imagen, pero ajustando el ancho de cada línea a 10 cm, conforme a las dimensiones reales de las líneas de demarcación vial.

Durante las visitas de inspección en sitio, se compararon las imágenes impresas directamente con la condición física de la demarcación existente en la vía. Esta metodología permitió identificar la imagen que mejor representaba el estado observado, facilitando así la estimación del porcentaje de área de pintura remanente adherida al pavimento.

Este procedimiento se fundamenta en la norma ASTM D913 – Standard Test Method for Evaluating Degree of Resistance of Traffic Paint to Abrasion, Erosion, or a Combination of Both, in Road Service Tests, la cual establece un conjunto de imágenes de referencia que representan distintos niveles de adherencia de pintura sobre superficies asfálticas. (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM). (s.f.). ASTM, 2020)

Se realizó mediciones en dos intervalos de tiempo: a los dos meses y a los seis meses posteriores a la aplicación (primera medición el 6 de octubre del 2024 y la segunda medición el, 15 de marzo del 2025), ver apéndice A. Si bien se contempla la posibilidad de realizar mediciones adicionales en otros momentos, se estableció un mínimo de dos evaluaciones.

Resistencia al deslizamiento o fricción de la demarcación vial horizontal

Para la evaluación de la resistencia al deslizamiento de las demarcaciones viales horizontales, se utilizó el ensayo con el Péndulo Británico, conforme a los lineamientos establecidos en la norma ASTM E303 Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester (Método de ensayo estándar para medir las propiedades de fricción superficial utilizando el péndulo británico.)

Las mediciones se realizaron en todos los tramos de prueba correspondientes al estudio, abarcando los tres tipos de material aplicados: pintura base solvente, pintura plástico en frío y termoplástico. En cada tipo de material se hicieron dos puntos sobre línea blanca y dos puntos sobre línea amarilla, con el fin de capturar la variabilidad asociada al color del pigmento y su interacción con la superficie.

La toma de datos se efectuó seis meses después de la aplicación de la demarcación, con el objetivo de evaluar el desempeño de los materiales en condiciones más representativas del estado en servicio. Este intervalo temporal permitió que las demarcaciones experimentaran una pérdida significativa de la microesfera superficial, y que el tránsito vehicular continuo provocara el pulido progresivo de la superficie, fenómeno que podría aumentar la susceptibilidad al deslizamiento. Inicialmente, la presencia de microesferas contribuye a una mayor rugosidad superficial, lo cual puede mejorar la fricción. Sin embargo, conforme se reduce la aspereza y se incrementa el alisamiento del recubrimiento, puede presentarse una disminución en la resistencia al deslizamiento.

El análisis tiene como finalidad comparar el comportamiento antideslizante de los tres sistemas de demarcación aplicados, identificando cuál presenta mayor o menor riesgo potencial de deslizamiento tras un período de desgaste.

3.3.3 Levantamiento de cambios generados por condiciones de exposición de la demarcación vial (inspección visual)

Se mantuvo el tramo en continua observación con el objetivo de identificar ventajas y desventajas de cada uno de los tipos de demarcación.

En esta tarea se revisó el desprendimiento de esfera, si hay Pérdida de color de las pinturas, si los desprendimientos son muy considerables (a partir de los resultados de adherencia vistos en esta misma sección), se revisó el comportamiento del material al tránsito, si se ha quebrado, pulverizado, deformado, levantado en capas o membranas, si ha tenido afectación por químicos, o ha sido vandalizado, así mismo si presenta afectaciones que se puedan atribuir al clima.

3.4 Fase 4 Análisis de datos

En esta sección se analizó cada una de las variables medidas y descritas en la Fase 3.

3.4.1 Análisis de las variables seleccionadas en la Fase 2 para cada uno de los paños de prueba

Retroreflectividad

Para el análisis de los datos relacionados a la retroreflectividad, se procedió inicialmente con la tabulación individual de todas las mediciones obtenidas, separándolas por cada uno de los paños de

prueba y por color de material evaluado. Esta organización permitió un manejo ordenado de la información y facilitó su posterior procesamiento.

Una vez tabulados los datos, se realizó un proceso de depuración estadística mediante el cálculo de la media estándar utilizando la herramienta Microsoft Excel. Esta etapa permitió identificar y excluir los valores atípicos, es decir, aquellos valores extremos significativamente más altos o más bajos que el resto de los datos, con el objetivo de conservar únicamente aquellos que resultaran más representativos del comportamiento real del material en cada tramo.

Posteriormente, se elaboraron representaciones gráficas con el fin de facilitar la interpretación de los resultados. La elaboración de estos gráficos se estructuró de la siguiente manera:

Gráficos por paño de prueba: Se generaron gráficos independientes para cada tramo estudiado, permitiendo observar el desempeño específico de la retroreflectividad según las condiciones particulares del sitio.

Gráficos por color: Se construyeron gráficos individuales por cada color de material (blanco y amarillo), lo cual facilitó el análisis comparativo del comportamiento de cada pigmento en las distintas condiciones de aplicación y exposición, esto es muy importante porque el color amarillo es el más expuesto al deterioro por estar en el centro.

Ordenamiento de datos: En cada gráfico, los valores de retrorreflectividad se dispusieron de forma descendente (de mayor a menor), con el propósito de identificar visualmente los rangos máximos y mínimos alcanzados por cada tipo de pintura.

Comparación temporal: Se incorporaron en un mismo gráfico las tres fechas de medición consideradas en esta investigación, lo cual permitió analizar el comportamiento de la retroreflectividad a lo largo del tiempo, evidenciando la evolución del desempeño del material desde su aplicación hasta la última medición.

Líneas de referencia normativa: En cada gráfico se incluyó una línea indicativa que representa el valor mínimo permitido de retrorreflectividad según lo estipulado en la norma costarricense INTE Q46 (para pintura base solvente y material termoplástico) y la norma colombiana NTC 47443:2023 (para pintura plástico en frío). Esta referencia normativa fue esencial para valorar el cumplimiento técnico de cada material frente a estándares de calidad internacionalmente reconocidos.

Este enfoque metodológico permitió una caracterización detallada y sistemática del desempeño retrorreflectivo de las pinturas analizadas, proporcionando una base sólida para su evaluación comparativa y la interpretación objetiva de los resultados.

Adherencia, desprendimiento y durabilidad

Para el análisis de la data generada en campo respecto a la adherencia, desprendimiento y durabilidad de los materiales aplicados, se elaboró una tabla en la que se indica el porcentaje de material aún adherido a la carpeta asfáltica en cada una de las dos mediciones realizadas. Esta representación permitió visualizar de forma clara el nivel de desprendimiento de cada tipo de demarcación. A partir de esta información, fue posible identificar cuáles materiales presentaron un mejor comportamiento en términos de permanencia sobre la superficie, así como aquellos con mayores niveles de pérdida, lo cual resulta clave para la evaluación de su durabilidad en condiciones reales de servicio.

Análisis de la resistencia al deslizamiento o fricción de la demarcación vial horizontal

El análisis de la resistencia al deslizamiento, expresada en términos de BPN (Número de Péndulo Británico), se realizó de forma similar al procedimiento aplicado para evaluar la adherencia y el desprendimiento. Para ello, se tabularon los valores de BPN obtenidos en cada uno de los paños de prueba, con el objetivo de comparar el desempeño de cada tipo de material en relación con la fricción superficial que ofrece la demarcación. Esta comparación permitió identificar cuáles materiales conservan mejores niveles de seguridad vial al contacto con los neumáticos, especialmente bajo condiciones húmedas.

3.4.2 Análisis de viabilidad económica de la demarcación con pintura plástico en frío contra las otras alternativas usadas en el país.

Se ha desarrollado un estudio comparativo de precios para los tres tipos de demarcación vial evaluados: pintura base solvente, pintura plástico en frío y material termoplástico, con base en datos recolectados en Costa Rica.

El enfoque metodológico consistió en comparar el precio por metro lineal ofertado para cada material, según las cotizaciones recopiladas.

Asimismo, el análisis de precios permitió examinar la pertinencia del uso de cada tipo de pintura según el alcance y las condiciones de cada proyecto, tomando en cuenta factores como la frecuencia de mantenimiento requerida y las exigencias funcionales del entorno vial.

Para facilitar la interpretación de la información, se elaboraron tablas resumen que permiten comparar de manera clara y directa los costos asociados a cada material. Estas tablas permiten identificar cuál alternativa presenta un mayor o menor costo por metro lineal, y evaluar de forma más precisa cuál opción resulta más conveniente.

Este análisis económico complementa los resultados de desempeño técnico, permitiendo una evaluación integral de las soluciones de demarcación consideradas en esta investigación.

3.4.3 Análisis de aspectos ambientales en los que la pintura plástico en frío podría inferir en el medio ambiente

Para el análisis del impacto ambiental de los tres tipos de demarcación evaluados en esta investigación, se sistematizó la información recopilada a través de fuentes documentales y observaciones directas realizadas durante el proceso de aplicación, conforme a lo establecido en la Fase 2 de esta metodología. La información obtenida sirvió de base para una valoración cualitativa del desempeño ambiental de cada alternativa.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANALISIS

Resultados

En la presente sección se presenta los resultados obtenidos de la investigación. Estos se presentan direccionados al cumplimiento de los objetivos general y específicos.

4.1 Paños de prueba

Los paños de prueba consisten en cuatro tramos independientes (A, B, C, D) de carretera, cada paño de prueba constituido por tres secciones con longitud de 40 metros para un total de 120 m: sección 1 con material termoplástico, sección 2 con pintura plástico en frío y sección 3 con pintura solvente.

Los cinco paños de prueba se ubican en la provincia de San José, cantón de Aserri, distrito de Aserri. En el Apéndice D se visualiza la ubicación de los 5 paños de prueba.

El paño de prueba A se ubica en barrio San Francisco, del Polideportivo de Aserri, 130 metros este y 10m sur. En el Apéndice E se ilustra los tramos en los cuales se demarcó cada tipo de material o pintura.

El paño de prueba B se ubica en Barrio El Socorro, del club de Leones de Aserri Centro 200 metros oeste. En el Apéndice F se ilustra los tramos en los cuales se demarcó cada tipo de material o pintura.

El paño de prueba C se ubica en María Auxiliadora del parque de La Piamonte 50 metros norte. En el Apéndice G se ilustra los tramos en los cuales se demarcó cada tipo de material o pintura.

El tramo D, se ubica en la misma comunidad de María Auxiliadora pero se identifica por ser llamada Maria Auxiliadora ARRIBA-ABAJO, se ubica del parque de la Piamonte 150 metros norte, este tramo es únicamente demarcación de línea centro amarillo. En el Apéndice H se ilustra la ubicación donde se demarcó cada tipo de material o pintura.

En los paños de prueba A,B y C se demarcó las líneas bordes de color blanco en ambos lados y la línea divisoria de carriles de color amarillo, el paño de prueba D solo tiene línea amarilla al centro.

Para analizar con mayor detalle el comportamiento de las pinturas blancas se demarca tres líneas de 40 cm mínimo de ancho de forma transversal con cada pintura (una línea con pintura solvente, una con pintura plástico en frío y una con material termoplástico). Estas líneas son ubicadas simultáneamente sin espacios divisorios. Con estas líneas se logrará exponer exactamente los materiales al mismo TPDA.

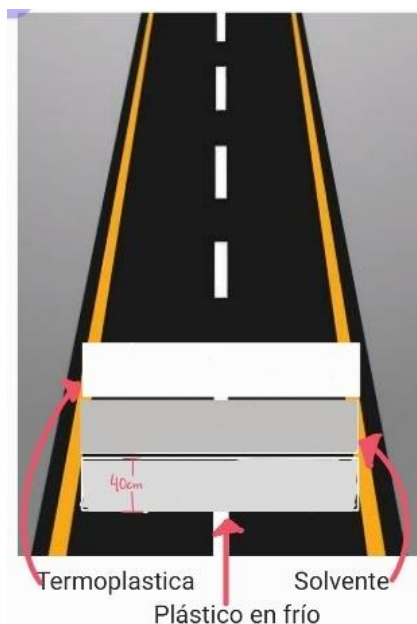


Figura 31 Líneas transversales de diferente tipo de material de color blanco

Con estas líneas trasversales se asegura exponer al mismo TPD la demarcación blanca. No se realiza esta prueba en amarillo porque este color es invasivo estéticamente y podría causar confusión al usuario, así mismo las líneas centro por su ubicación están expuestas a mayor deterioro por el tránsito.

Según indica el ingeniero Juan Pablo Quesada Guerrero, en su tesis titulada "Evaluación de la compatibilidad entre materiales de demarcación vial horizontal para la redemarcación sobre marcas existentes en carreteras de Costa Rica", existe buena adherencia entre las pinturas solventes y termoplásticas, es por esta razón que se ha considerado dos tramos con demarcaciones, existentes en pintura solvente (Guerrero, 2021). Esta prueba permitirá analizar el comportamiento de la pintura plástica en frío bajo estas condiciones específicas.

4.2 Evaluación de la condición de los paños de prueba previo a la realización de las demarcaciones.

Previo a la instalación de las demarcaciones, se realizó una evaluación detallada de cada paño de prueba con el objetivo de garantizar la homogeneidad de las condiciones. Se verificó la ausencia de factores que pudieran introducir sesgos en el estudio, tales como escorrentías de agua (potable o contaminada) y variaciones en el estado de la superficie asfáltica. Esta evaluación inicial es crítica para asegurar la comparabilidad de los resultados entre los diferentes tipos de demarcación.

Los 5 paños de prueba tienen condiciones físicas diferentes y se detallan a continuación.

4.2.1 Tramo A San Francisco.

Este tramo es una calzada de 5,5m de ancho, con pendiente de 2%. La carpeta asfáltica fue colocada en el año 2021, con mezcla de 12mm. En este tramo se evaluó las líneas laterales y línea centro



Figura 32 Paño de prueba A, Barrio San Francisco

4.2.2 Tramo B Barrio El Socorro

Este tramo es una calzada de 5,8 m de ancho, con pendiente de 5%. La carpeta asfáltica fue colocada en el año 2022, con mezcla de 12mm. En este tramo se evaluó las líneas laterales y línea centro



Figura 33 Paño de prueba B, Barrio El Socorro

4.2.3 Tramo C María Auxiliadora

Este tramo es una calzada de 4,8 a 5,1 m de ancho, con pendiente de 4%. Se desconoce el año de colocación de la carpeta asfáltica, se observa que es mezcla de 12mm, la calle tiene daños por fatiga y parte de la demarcación quedará sobre áreas lagarteadas. Esta calle es una de las rutas alternas del centro del catón ya que es una vía por la que se evita el paso por la escuela, puestos comerciales, iglesia católica parroquial, parque central entre otros puntos que generan congestión vial. En este tramo se evaluó las líneas laterales y línea centro



Figura 34 Paño de prueba C, Barrio María Auxiliadora

4.2.4 Tramo D María Auxiliadora Arriba / Abajo

Este tramo es una calzada de 5,2 m de ancho, con pendiente de 5%. Se desconoce el año de colocación de la carpeta asfáltica, se observa que es mezcla de 12mm, hay numerosos baches de diferente mezcla por su color y textura, la calle tiene daños por fatiga y parte de la demarcación quedará sobre áreas lagarteadas. En este tramo se evaluó la línea centro



Figura 35 Paño de prueba D, Barrio María Auxiliadora Arriba



Figura 36 Paño de prueba D, Barrio María Auxiliadora Abajo

4.3 Ensayos de Evaluación

Para garantizar el control de calidad durante el proceso de demarcación, se contó con el respaldo de laboratorios nacionales certificados.

Durante los días de aplicación de la demarcación, el **laboratorio LGC Ingeniería en Pavimentos** realizó mediciones de espesor en los tres materiales evaluados, así como muestreo para análisis de sus propiedades. Posteriormente, para la medición de la retroreflectividad, se contó con la participación del **laboratorio Ingeniería Técnica de Proyectos (ITP)**.

Cabe destacar que ambos laboratorios están certificados por el **Ente Costarricense de Acreditación (ECA)**, lo que garantiza la confiabilidad y precisión de los resultados obtenidos, respaldados por estándares de calidad reconocidos.

El Laboratorio LGC ejecutó el muestreo de pintura solvente, plástico en frío y material termoplástico con el fin de determinar sus propiedades físicas. En el caso específico de la pintura solvente y el material termoplástico, el análisis se orientó a la verificación del cumplimiento de los parámetros especificados en las normas. Para el plástico en frío, el objetivo fue la caracterización de sus propiedades.

Sobre frecuencia de los ensayos es importante informar que no se cumple con las mediciones mínimas y máximas solicitadas por las normas aplicables en Costa Rica, esto debido a que los tramos a realizar son investigativos y no son ensayos para aceptación de obras viales por ende se selecciona la frecuencia de forma que se pueda obtener información representativa a los tramos de prueba y que permita controlar el comportamiento en las pinturas según la longitud investigada.

A continuación se detalla los ensayos que se realizaron durante el periodo experimental:

Medición de espesores: se realiza 2 puntos de medición de cada línea de 40 metros. En total en cada tramo de prueba se realizó 18 mediciones de espesor. Los espesores de termoplástico se norman con la INTE Q46ENM1, los espesores de la pintura solvente y plástico en frío se norman con ASTM D4414 e INTE Q46 y la **NTC 4744-4:2023**.

Esta ultima norma regula los espesores según la siguiente tabla:

Tabla 7 Espesores de materiales de demarcación vial normados por la INTE Q46

Tipo de pintura	Espesor de película de pintura húmeda	Espesor de película de pintura seca
	mm (mils)	mm (mils)
Base solvente	0,41 ± 0,04 (16 ± 2)	0,23 ± 0,04 (9 ± 2)
Base agua tipo I y II	0,41 ± 0,04 (16 ± 2)	0,23 ± 0,04 (9 ± 2)
Base agua tipo III	0,76 ± 0,04 (30 ± 2)	0,43 ± 0,04 (17 ± 2)
Termoplástico	N.A.	2,25 ± 0,75 (88 ± 3)

Fuente: Norma INTE Q46:2021 Guía de buenas prácticas para la demarcación vial horizontal.

Tabla 8 Medición de espesores de materiales de demarcación

	Socorro		San Francisco		Auxiliadora		Auxiliadora Arriba-Abajo	
	Unidades en miles							
Material	Blanco	Amarillo	Blanco	Amarillo	Blanco	Amarillo	Blanco	Amarillo
Solvente	18	17	17,5	17	18	18	N/A	17
Termoplástico	85	92	90	85	87	86		92
Plástico en frío	24	25	23	27	23	26		24

A continuación algunas imágenes obtenidas en campo durante la medición de espesores.



Figura 37 Medición de espesor de material termoplástico el 31 de julio, 2024 Barrio San Francisco



Figura 38 Medición de espesor de material termoplástico el 01 de agosto, 2024 Barrio María Auxiliadora.



Figura 39 Medición de espesor de pintura base solvente el 03 de agosto, 2024 Barrio María Auxiliadora.



Figura 40 Medición de espesor de pintura plástico en frio el 12 de agosto, 2024 Barrio María Auxiliadora.



Figura 41 Medición de espesor de pintura plástico en frío el 13 de agosto, 2024 Barrio María Auxiliadora.

Verificación de humedad en la superficie.

Se procedió a revisar la humedad de la superficie previo a demarcar sin embargo días previos a cada demarcación. Para todos los días de labor no se generaron gotas en la lámina de plástico como se muestra en la siguiente imagen.



Figura 42 Medición de humedad previo demarcaciones.

Muestreo de material:

Se muestreo cada pintura de color blanco y de color amarillo de todos los tipos de pintura para un total de total son 6 muestreos.

En las siguientes imágenes se muestra algunos muestreos a los materiales utilizados.



Figura 43 Muestro de material termoplástico amarillo



Figura 44 Muestreo de componentes de pintura plástico en frío

Contenido de pigmento de los materiales para demarcación mediante calcinación a baja temperatura (%) :

Se realizó ensayo de contenido de pigmento a cada pintura y al material termoplástico. Las normas utilizadas fueron ASTM D-4451.

Tiempo de No levantamiento No Pick- Up Time

Se realizó ensayos de tiempo de secado de la pintura y el material termoplástico. La norma que se utilizará es la ASTM D-711.

Método de prueba estándar para la consistencia de las pinturas medición de la viscosidad KU

Este ensayo se utiliza con un viscosímetro tipo Stormer (KU) y se implementa la norma ASTM D 562.

A continuación se presenta los resultados de dichos análisis.

Tabla 9 *Análisis de material termoplástico color blanco*

Muestra LGC	Fecha(s) de realización	Método de ensayo	Ensayo	Resultados
01-32128-2024	2024-08-08	ASTM D-4451	I-69 contenido de pigmento de los materiales para demarcación mediante calcinación a baja temperatura (%)	64,54 %

Fuente: Informe 01-1833-2024, Laboratorio LGC

Tabla 10 *Análisis de material termoplástico color amarillo*

Muestra LGC	Fecha(s) de realización	Método de ensayo	Ensayo	Resultados
01-31813-2024	2024-08-08	ASTM D-4451	I-69 Contenido de pigmento de los materiales para demarcación mediante calcinación a baja temperatura (%)	77,47%

Fuente: Informe 01-1833-2024, Laboratorio LGC

Tabla 11 *Análisis de pintura base solvente amarilla*

Muestra LGC	Fecha(s) de realización	Método de ensayo	Ensayo	Resultados
01-31840-2024	2024-08-08	ASTM D-4451	I-69 Contenido de pigmento de los materiales para demarcación mediante calcinación a baja temperatura (%)	57,31%
	2024-08-08	ASTM D-711	I-68 Tiempo de No levantamiento No Pick- Up Time de pintura para demarcación horizontal (min)	15 minutos
	2024-08-08	ASTM D-562	I-67 Método de prueba estándar para la consistencia de las pinturas medición de la viscosidad KU usando un viscosímetro tipo Stormer (KU)	78,9 ku

Fuente: Informe 01-1833-2024, Laboratorio LGC

Tabla 12 *Análisis de pintura base solvente blanca*

Muestra LGC	Fecha(s) de realización	Método de ensayo	Ensayo	Resultados
01-31841-2024	2024-08-08	ASTM D-4451	I-69 Contenido de pigmento de los materiales para demarcación mediante calcinación a baja temperatura (%)	58,18 %
	2024-08-08	ASTM D-711	I-68 Tiempo de No levantamiento No Pick- Up Time de pintura para demarcación horizontal (min)	14,3 minuto
	2024-08-08	ASTM D-562	I-67 Método de prueba estándar para la consistencia de las pinturas medición de la viscosidad KU usando un viscosímetro tipo Stormer (KU)	83,1ku

Fuente: Informe 01-1833-2024, Laboratorio LGC

Para la realización de los ensayos anteriores se aplicó las siguientes normativas:

Tabla 13 *Normativa aplicada a los ensayos de laboratorio a las pinturas y material termoplástico.*

Nombre del Ensayo	Método de Ensayo, Norma u otro
I-66 Método de ensayo para el muestreo de Pintura termoplástica	ASTM D7307
I-66 Método de ensayo para el muestreo de Pintura fluida	ASTM D3925 INTE Q37 INTE Q46
I-68 Método de ensayo para el tiempo de no levantamiento NO PICK-UP TIME de pintura para demarcación horizontal	ASTM D711
I-69 Método de ensayo para el contenido de pigmento de los materiales para demarcación mediante calcinación a baja temperatura	ASTM D4451
I-67 Método de prueba estándar para la consistencia de las pinturas medición de la viscosidad en unidades Krebs KU usando un viscosímetro tipo Stormer	ASTM D562

Tabla 14 *Análisis de pintura plástico en frío blanca*

Componente a muestra LGC	Fecha(s) de realización	Método de ensayo	Ensayo	Resultados
01-32776-2024	2024-08-20	ASTM D-4451	I-69 Contenido de pigmento de los materiales para demarcación mediante calcinación a baja temperatura (%)	60,89%
Componente A	2024-08-20	ASTM D-562	I-67 Método de prueba estándar para la consistencia de las pinturas medición de la viscosidad KU usando un viscosímetro tipo Stormer (KU)	93,2 ku

Fuente: Informe 01-1834-2024, Laboratorio LGC

Tabla 15 *Análisis de pintura plástico en frío blanca*

Componente a muestra LGC	Fecha(s) de realización	Método de ensayo	Ensayo	Resultados
01-32777-2024	2024-08-20	ASTM D-4451	I-69 Contenido de pigmento de los materiales para demarcación mediante calcinación a baja temperatura (%)	57,13 %
Componente B + Catalizador	2024-08-20	ASTM D-562	I-67 Método de prueba estándar para la consistencia de las pinturas medición de la viscosidad KU usando un viscosímetro tipo Stormer (KU)	84,9 ku

Fuente: Informe 01-1834-2024, Laboratorio LGC

Tabla 16 *Análisis de pintura plástico en frío blanca*

Componente a muestra LGC	Fecha(s) de realización	Método de ensayo	Ensayo	Resultados
01-32776-2024	2024-08-20	ASTM D-4451	I-69 Contenido de pigmento de los materiales para demarcación mediante calcinación a baja temperatura (%)	65,79 %
Componente A + Componente B	2024-08-20	ASTM D-562	I-67 Método de prueba estándar para la consistencia de las pinturas medición de la viscosidad KU usando un viscosímetro tipo Stormer (KU)	90,3 ku

Fuente: Informe 01-1834-2024, Laboratorio LGC

Tabla 17 *Análisis de pintura plástico en frío amarillo*

Componente a muestra LGC	Fecha(s) de realización	Método de ensayo	Ensayo	Resultados
01-32854-2024 Componente A	2024-08-20	ASTM D-4451	I-69 Contenido de pigmento de los materiales para demarcación mediante calcinación a baja temperatura (%)	46,10%
	2024-08-20	ASTM D-562	I-67 Método de prueba estándar para la consistencia de las pinturas medición de la viscosidad KU usando un viscosímetro tipo Stormer (KU)	74,8ku
01-32855-2024 Componente B + Catalizador	2024-08-20	ASTM D-4451	I-69 Contenido de pigmento de los materiales para demarcación mediante calcinación a baja temperatura (%)	39,29%
	2024-08-20	ASTM D-562	I-67 Método de prueba estándar para la consistencia de las pinturas medición de la viscosidad KU usando un viscosímetro tipo Stormer (KU)	65,2ku
01-32855-2024 Componente A + Componente B	2024-08-20	ASTM D-4451	I-69 Contenido de pigmento de los materiales para demarcación mediante calcinación a baja temperatura (%)	48,81%
	2024-08-20	ASTM D-562	I-67 Método de prueba estándar para la consistencia de las pinturas medición de la viscosidad KU usando un viscosímetro tipo Stormer (KU)	71,3ku

Fuente: Informe 01-1834-2024, Laboratorio LGC

4.4 Caracterización de la pintura y materiales empleados en la demarcación

En esta sección se detallan los tipos de pintura y material termoplástico empleados en los paños de prueba. Se proporciona información completa sobre cada producto, incluyendo marca, país de origen y normativas aplicables, según lo especificado en las etiquetas de cada material. Este registro detallado permite establecer la trazabilidad y calidad exacta de las pinturas y el material termoplástico utilizados como referencia comparativa para la pintura plástica en frío.

Solvente

Pintura amarilla y blanca

Marca de la pintura: Voller

Tipo: trafico pesado BS

País de origen: México

Microesfera para solvente

Marca: Swarco, Road Marking Systems

Tipo 1 y 2 (150-850H/T14 y 180-850H/T14)

Código: 30022150 2450055 y 30022740 2450075

Norma que cumple: AASTHO 247

País de origen: Australia

Material Termoplástico

Color blanco:

Marca de la pintura: Voller

Tipo: Thermoplastic, Marking Products for Signaling.

Normativa que cumple: AASHTO M249

Temperatura para calentado: 200°C a 220°C

Fabricado y distribuido por: Sánchez S.A de CV

País de origen: México

Color amarillo

Marca de la pintura: Visever

Tipo: Termoplástico en caliente

Normativa que cumple: AASHTO M249

Temperatura para aplicación: 180°C-200°C

Fabricado y distribuido por: Visever Fabricacion S.L

País de origen: España Villarrobledo

Microesfera para termoplástica:

Marca: Swarco, Road Marking Systems

Tipo 3: 850.1400 H/T14

Norma que cumple: AASTHO 247

Código: 3002279 2450010

País de origen: Australia

Plástico en Frío

Microesfera para pintura blanca

Marca: Glasstek

Tipo:1

Norma que cumple: AASTHO 247-2(2013)

Marca del equipo: Graco, line lazer

Microesfera para pintura amarilla

Marca: Potters, Ballotini,

Fabrica: Panamericana S de R.L. de C.V.

Lote: 2005071611

País de origen: Mexico

Catalizador:

Marca: Benzoyl peroxide en pasta

Pintura blanca y amarilla

Marca: Pintuco

Norma que cumple: NTC 1360, y NTC 4744.

País de Origen: Colombia

Empresa fabricante: Pintuco Colombia S.A.,

Marca del equipo: Graco, line lazer

4.5 Condiciones de exposición de la demarcación vial

La demarcación vial horizontal, a lo largo de su vida útil, está expuesta a diversas condiciones ambientales y mecánicas que contribuyen a su deterioro. Entre los principales factores de desgaste se incluyen la acción de agentes climáticos, el tráfico vehicular y las características del pavimento, lo que puede generar grietas, desprendimiento del material y una reducción progresiva de la retroreflectividad.

En el presente estudio, se evaluaron tres secciones de prueba con características diferenciadas en cuanto al ancho de la calzada, el estado y tipo de pavimento, la pendiente y la intensidad del tránsito vehicular. A continuación, se describen las condiciones más relevantes que influyen en la exposición y desempeño de la demarcación sometida a prueba.

4.5.1 Tránsito

Dado que el tránsito vehicular es el principal factor de desgaste y deterioro de la demarcación vial, se ha llevado a cabo la medición del volumen de tráfico en cada tramo de prueba y para cada carril. En la tabla 16 se muestra los resultados del tránsito promedio diario promediado de dos mediciones realizadas para cada tramo de prueba.

Barrio San Francisco: el conteo se realizó el miércoles 19 de marzo del 2025

Barrio Socorro: el conteo se realizó los días 25 y 26 de marzo del 2025

Barrio María Auxiliadora: el conteo se realizó los días 25 y 26 de marzo del 2025

A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 18 *Transito diario en cada paño de prueba*

Paño de prueba	Tipo de vehículo	% en el TD	TPD
San Francisco	Liviano	85%	468
	Pickup	14%	
	Bus C2	1%	
María Auxiliadora	Liviano	87%	1419
	Pickup	10%	
	Bus C2	1%	
	C2	2%	
Barrio El Socorro	Liviano	83%	1496
	Pickup	14%	
	Bus	2%	
	C2	1%	
María Auxiliadora Arriba-Abajo	Liviano	83%	979
	Pickup	12%	
	Bus	4%	
	C2	1%	

4.5.2 Clima

Según el Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica, el cantón de Aserrí se ubica dentro de la Región Central Intermontana, específicamente en la subregión VC2, (Instituto Nacional Meteorológico). Esta zona presenta las siguientes características climáticas promedio:

- Precipitación media anual: 2 016 mm
- Temperatura máxima media anual: 26 °C
- Temperatura mínima media anual: 15 °C
- Temperatura media anual: 20 °C
- Promedio de días con lluvia al año: 128 días

Este régimen climático corresponde a un clima mesotermal húmedo, propio de zonas intermontanas de altitud media, con marcada estacionalidad y una estación seca bien definida, influenciada por factores orográficos y la dinámica atmosférica del Valle Central.

4.6 Retroreflectividad

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de las mediciones de retrorreflectividad realizadas en los distintos paños de prueba. Inicialmente, se expone la totalidad de los datos recolectados para cada tipo de línea (blanca y amarilla), diferenciando el tipo de material aplicado, sitio de estudio (pañó de prueba) y la fecha en que se efectuó cada medición.

Posteriormente, se procedió con la depuración de los datos recolectados, con el propósito de eliminar valores atípicos que pudieran distorsionar el análisis estadístico. Esta etapa permitió conservar únicamente aquellos datos que presentan un comportamiento representativo respecto al conjunto general de la muestra, garantizando así una mayor confiabilidad en la interpretación de los resultados.

Las mediciones del color blanco fueron tomadas de las líneas laterales del lado izquierdo y derecho y se encuentran mezclados.

Las mediciones fueron tomadas aproximadamente cada 5 metros.

Sitio de estudio: Barrio San Francisco

Tabla 19 Resultados de mediciones de retroreflectividad para pintura plástico en frío

Retroreflectividad pintura plástica en frío, cd/lx/m²							
Color amarillo				Color blanco			
Fecha							
Medición realizada a 15 días 27/8/2024	Medición realizada a 59 días 10/10/2024	Medición realizada a 67 días 24/10/2024	Medición realizada a 204 días 27/2/2025	Medición realizada a 15 días 27/8/2024	Medición realizada a 59 días 10/10/2024	Medición realizada a 67 días 24/10/2024	Medición realizada a 204 días 27/2/2025
159	154	198	135	134	140	149	240
123	133	123	131	373	169	237	231
158	154	243	141	172	155	122	199
125	144	281	157	166	161	152	210
128	129	153	189	189	235	230	194
147	129	152	210	230	209	204	194
129	110	149	177	190	361	260	223
117	138	178	169	276	235	206	185
117	113	159	123	199	115	165	273
127	126	168	139	228	195	171	250
				205	260	136	135
				227	144	150	131
				173	309	312	141
				168	172	112	157
				215	266	112	189
				223	284	119	210
				227	292	124	177
				195	344	140	169
				232	214	125	123
				209		104	139

Fuente: Informe de ensayos, CD-ITP-1094-2024-35-C01 y CD-ITP-1218-2024-35-C01, Ingeniería Técnica de Proyectos ITP, S.A.

Tabla 20 Resultados de mediciones de retroreflectividad para pintura solvente

Retroreflectividad pintura Solvente, cd/lx/m²					
Color amarillo			Color blanco		
Fecha					
Medición realizada a 10 días 14/8/2024	Medición realizada a 67 días 10/10/2024	Medición realizada a 204 días 24/2/2025	Medición realizada a 10 días 14/8/2024	Medición realizada a 67 días 10/10/2024	Medición realizada a 204 días 24/2/2025
464	181	62	183	287	109
294	234	60	197	195	110
270	147	63	203	225	260
258	241	11	310	284	210
247	227	15	206	219	173
145	93	18	186	211	180
248	210	10	364	185	161
292	291	23	272	251	161
255	236	35	206	226	154
237	243	40	330	234	159
			286	217	148
			231	168	206
			208	194	180
			261	194	171
			222	93	186
			246	142	210
			225	165	148
			265	228	156
			266	150	131
			275	261	128
			221		
			270		
			237		

Fuente: Informe de ensayos, CD-ITP-1094-2024-35-C01 y CD-ITP-1218-2024-35-C01, Ingeniería Técnica de Proyectos ITP, S.A.

Tabla 21 Resultados de mediciones de retrorreflectividad para material termoplástico

Retroreflectividad material termoplástico, cd/lx/m²					
Color amarillo			Color blanco		
Fecha					
Medición realizada a 13 días 14/8/2024	Medición realizada a 70 días 10/10/2024	Medición realizada a 207 días 24/2/2025	Medición realizada a 13 días 14/8/2024	Medición realizada a 70 días 10/10/2024	Medición realizada a 207 días 24/2/2025
299	311	161	295	551	412
274	333	236	395	466	391
283	290	190	271	283	299
292	350	199	365	342	315
221	472	221	339	421	318
366	220	216	247	343	359
401	237	364	225	377	363
388	422	252	388	375	333
378	367	291	398	334	372
398	206	302	236	413	389
286	311	295	321	351	313
			300	489	293
			433	350	362
			313	456	271
			384	440	310
			340	386	315
			438	402	257
			488	362	322
			339	437	415
			298	405	319
			367	388	351
			321	103	299
			293		
			406		
			396		
			371		
			314		
			416		

Fuente: Informe de ensayos, CD-ITP-1094-2024-35-C01 y CD-ITP-1218-2024-35-C01, Ingeniería Técnica de Proyectos ITP, S.A.

Sitio de estudio: Barrio Socorro

Tabla 22 Resultados de mediciones de retrorreflectividad

Retrorreflectividad pintura plástico en frío, cd/lx/m²							
Color amarillo				Color blanco			
Fecha							
Medición realizada a 15 días 27/8/2024	Medición realizada a 59 días 10/10/2024	Medición realizada a 67 días 24/10/2024	Medición realizada a 204 días 27/2/2025	Medición realizada a 15 días 27/8/2024	Medición realizada a 59 días 10/10/2024	Medición realizada a 67 días 24/10/2024	Medición realizada a 204 días 27/2/2025
101	155	136	99	185	252	218	185
118	171	150	96	193	154	224	312
129	258	312	101	193	313	202	371
112	136	112	90	273	376	289	352
100	131	112	121	175	350	343	299
100	131	119	125	181	363	323	275
111	113	104	132	191	305	284	289
199	134	110	108	200	301	220	328
134	104	125	110	177	235	264	370
125	108	104	111	207	264	197	351
				187	358	228	227
				200	259	208	301
				195	292	256	291
				270	251	212	253
				239	323	259	231
				279	323	266	259
				235	235	254	253
				197	261	218	275
				235	210	246	311
				189	240	213	299
							221

Fuente: Informe de ensayos, CD-ITP-1094-2024-35-C01 y CD-ITP-1218-2024-35-C01, Ingeniería Técnica de Proyectos ITP, S.A.

Tabla 23 Resultados de mediciones de retrorreflectividad

Retroreflectividad pintura solvente cd/lx/m²					
Color amarillo			Color blanco		
Fecha					
Medición realizada a 10 días 14/8/2024	Medición realizada a 67 días 10/10/2024	Medición realizada a 204 días 24/2/2025	Medición realizada a 10 días 14/8/2024	Medición realizada a 67 días 10/10/2024	Medición realizada a 204 días 24/2/2025
246	191	98	68	313	211
306	249	131	116	258	199
265	205	110	173	236	227
313	283	112	212	310	231
296	272	126	245	265	216
353	322	115	297	242	190
316	273	90	267	341	227
216	171	99	308	312	230
301	223	90	203	346	212
		98	272	314	195
			257	194	258
			367	149	115
			348	238	157
			288	169	212
			253	339	199
			226	258	241
			210	241	233
			235	279	221
			289	349	219
			207		222
			223		

Fuente: Informe de ensayos, CD-ITP-1094-2024-35-C01 y CD-ITP-1218-2024-35-C01, Ingeniería Técnica de Proyectos ITP, S.A.

Tabla 24 Resultados de mediciones de retrorreflectividad

Retrorreflectividad material termoplástico, cd/lx/m²					
Color amarillo			Color blanco		
Fecha					
Medición realizada a 13 días 14/8/2024	Medición realizada a 70 días 10/10/2024	Medición realizada a 207 días 24/2/2025	Medición realizada a 13 días 14/8/2024	Medición realizada a 70 días 10/10/2024	Medición realizada a 207 días 24/2/2025
451	301	294	245	325	401
260	370	251	225	401	329
325	150	150	287	401	315
249	115	141	273	262	358
395	315	110	259	284	306
377	286	121	284	388	312
290	119	153	234	360	297
303	440	201	427	492	341
302		215	223	328	402
299		249	341	401	411
			267	442	480
			316	296	391
			273	348	371
			376	206	369
			396	290	363
			303	600	381
			168	302	391
			256	514	231
			475	442	251
			376	379	290
			400		313
			355		
			327		
			340		
			405		
			397		

Fuente: Informe de ensayos, CD-ITP-1094-2024-35-C01 y CD-ITP-1218-2024-35-C01, Ingeniería Técnica de Proyectos ITP, S.A.

Sitio de estudio: María Auxiliadora

Tabla 25 Resultados de mediciones de retrorreflectividad

Retroreflectividad pintura plástica en frío, cd/lx/m²							
Color amarillo				Color blanco			
Fecha							
Medición realizada a 15 días 27/8/2024	Medición realizada a 59 días 10/10/2024	Medición realizada a 67 días 24/10/2024	Medición realizada a 204 días 27/2/2025	Medición realizada a 15 días 27/8/2024	Medición realizada a 59 días 10/10/2024	Medición realizada a 67 días 24/10/2024	Medición realizada a 204 días 27/2/2025
145	106	106	98	126	114	114	239
194	104	104	102	235	288	220	219
101	94	94	97	171	256	212	250
97	108	108	116	304	224	291	311
104	95	95	104	320	333	285	291
104	105	105	95	276	321	351	282
126	93	93	89	270	370	283	255
144	150	150	85	254	264	214	261
145	119	119	92	256	279	224	213
115	136	136	96	240	188	223	234
				192	356	260	85
				211	336	170	197
				294	376	230	312
				256			199
				212			295
				229			181
				259			310
				190			256
				214			216
				200			221

Fuente: Informe de ensayos, CD-ITP-1094-2024-35-C01 y CD-ITP-1218-2024-35-C01, Ingeniería Técnica de Proyectos ITP, S.A.

Tabla 26 Resultados de mediciones de retrorreflectividad

Retroreflectividad pintura Solvente, cd/lx/m²					
Color amarillo			Color blanco		
Fecha					
Medición realizada a 10 días 14/8/2024	Medición realizada a 67 días 10/10/2024	Medición realizada a 204 días 24/2/2025	Medición realizada a 10 días 14/8/2024	Medición realizada a 67 días 10/10/2024	Medición realizada a 204 días 24/2/2025
154	246	60	83	354	253
115	123	100	90	209	231
133	143	90	263	188	123
189	172	95	232	272	271
177	191	89	249	156	145
239	131	71	264	261	154
192	115	121	253	187	157
209	156	99	313	225	181
205	143	101	274	216	196
200	139	100	229	165	140
			284	372	131
			181	409	112
			151	165	211
			248	278	214
			155	281	191
			270	280	187
			239	137	212
			147	236	111

Fuente: Informe de ensayos, CD-ITP-1094-2024-35-C01 y CD-ITP-1218-2024-35-C01, Ingeniería Técnica de Proyectos ITP, S.A.

Tabla 27 Resultados de mediciones de retrorreflectividad

Retrorreflectividad material termoplástico, cd/lx/m²					
Color amarillo			Color blanco		
Fecha					
Medición realizada a 13 días 14/8/2024	Medición realizada a 70 días 10/10/2024	Medición realizada a 207 días 24/2/2025	Medición realizada a 13 días 14/8/2024	Medición realizada a 70 días 10/10/2024	Medición realizada a 207 días 24/2/2025
251	225	189	376	510	413
387	192	151	282	688	390
261	236	149	341	288	381
220	324	113	378	439	352
257	179	191	471	365	239
221	442	212	362	334	450
184		241	275	275	412
234		100	299	448	431
249		119	325	525	339
240		112	435	463	409
			360	463	415
			403	410	391
			292	283	352
			339	357	335
	324		297	345	
367	381	310			
329	562	400			

Fuente: Informe de ensayos, CD-ITP-1094-2024-35-C01 y CD-ITP-1218-2024-35-C01, Ingeniería Técnica de Proyectos ITP, S.A.

Sitio de estudio: María Auxiliadora Arriba y Abajo

Tabla 28 *Resultados de mediciones de retrorreflectividad*

Barrio María Auxiliadora Arriba				Barrio María Auxiliadora Abajo			
Retroreflectividad pintura plástico en frío, cd/lx/m²				Retroreflectividad pintura plástico en frío, cd/lx/m²			
Color amarillo				Color amarillo			
Fecha							
Medición realizada a 15 días 27/8/2024	Medición realizada a 59 días 10/10/2024	Medición realizada a 67 días 24/10/2024	Medición realizada a 204 días 27/2/2025	Medición realizada a 15 días 27/8/2024	Medición realizada a 59 días 10/10/2024	Medición realizada a 67 días 24/10/2024	Medición realizada a 204 días 27/2/2025
92	101	110	99	108	123	109	90
114	112	105	78	186	114	112	101
111	106	101	85	91	114	89	151
111	114	95	100	110	119	89	142
109	106	106	115	108	105	110	143
93	104	103	121	92		114	113
105	100	90	135				
113	134	103	191				
99	109	100	152				
109	119	110	136				

Fuente: Informe de ensayos, CD-ITP-1094-2024-35-C01 y CD-ITP-1218-2024-35-C01, Ingeniería Técnica de Proyectos ITP, S.A.

Tabla 29 Resultados de mediciones de retrorreflectividad

Barrio María Auxiliadora Arriba			Barrio María Auxiliadora Abajo		
Retrorreflectividad pintura solvente, cd/lx/m ²			Retrorreflectividad pintura solvente, cd/lx/m ²		
Color amarillo			Color amarillo		
Fecha			Fecha		
Medición realizada a 10 días 14/8/2024	Medición realizada a 67 días 10/10/2024	Medición realizada a 204 días 24/2/2025	Medición realizada a 10 días 14/8/2024	Medición realizada a 67 días 10/10/2024	Medición realizada a 204 días 24/2/2025
187	86	98	249	112	53
154	149	48	265	112	61
137	90	61	158	90	81
130	85	57	169	120	82
190	109	60	164	120	75
190	80	91	136	100	61
183	161	100	118	114	69
151	85	81	136	85	71
115	86	84	128	95	101
148	80	60	119	159	112
200	80		125	119	91

Fuente: Informe de ensayos, CD-ITP-1094-2024-35-C01 y CD-ITP-1218-2024-35-C01, Ingeniería Técnica de Proyectos ITP, S.A.

Tabla 30 Resultados de mediciones de retrorreflectividad

Barrio María Auxiliadora Arriba			Barrio María Auxiliadora Abajo		
Retrorreflectividad material termoplástico, cd/lx/m ²			Retrorreflectividad material termoplástico, cd/lx/m ²		
Color amarillo			Color amarillo		
Fecha			Fecha		
Medición realizada a 13 días 14/8/2024	Medición realizada a 70 días 10/10/2024	Medición realizada a 207 días 24/2/2025	Medición realizada a 13 días 14/8/2024	Medición realizada a 70 días 10/10/2024	Medición realizada a 207 días 24/2/2025
288	304	125	203	214	151
306	424	117	448	261	191
176	173	91	325	100	212
352	372	261	254	109	212
358	202	177	241	294	214
350	209	201	277	157	125
146	213	213	373	189	152
251			216	154	171
385				317	169
258				231	184
				175	168

Fuente: Informe de ensayos, CD-ITP-1094-2024-35-C01 y CD-ITP-1218-2024-35-C01, Ingeniería Técnica de Proyectos ITP, S.A.

A partir de los datos obtenidos en las mediciones de retroreflectividad, se realizó un proceso de depuración estadística de la información. Para ello, se aplicó un análisis basado en la desviación estándar, eliminando aquellos valores atípicos que se encontraban por encima o por debajo del 10 % del total de las mediciones. Este procedimiento permitió excluir datos no representativos que podrían sesgar el análisis del comportamiento general del material demarcado.

Análisis estadístico de variabilidad del promedio entre las demarcaciones

Se llevó a cabo un análisis estadístico de la variabilidad de la desviación con el objetivo de determinar si existen diferencias significativas en los valores de retrorreflectividad entre los distintos tipos de materiales, esto se logró comparando cada tipo de material (termoplástico con plástico en frío, termoplástico con base solvente y base solvente con plástico en frío)

Este análisis se realizó únicamente para la primer medición (primer ronda de medición de retroreflectividad llevada a cabo a los 15 días de la demarcación de cada material) ya que para las segunda y tercera el comportamiento mas importante a evaluar es la permanencia de la retroreflectividad en el tiempo.

Las hipótesis para este análisis son las siguientes:

Ho: Hipótesis nula: La retroreflectividad de los materiales analizados son iguales

H1: La retroreflectividad de los materiales analizados NO son iguales (se rechaza H0)=(se acepta H1)

Es importante considerara estos dos determinantes para este análisis:

- Si el p-valor es menor que el nivel de significancia establecido (generalmente $\alpha = 0.05$), se rechaza la hipótesis nula, lo que sugiere que la retroreflectividad de los materiales son diferentes.
- Si el p-valor es mayor que α , no se rechaza la hipótesis nula, lo que indica las retroreflectividad de los materiales son muy parecidas.

Para este análisis, se aplicó el método de análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de confiabilidad del 95%.

En el Apéndice I se incluye el detalle completo del cálculo del ANOVA, ejecutado con el programa Excel

A continuación se presenta los resultados del ANOVA en resumen y su respectivo análisis:

Tabla 31 *Análisis estadístico de la variabilidad de la desviación en el paño de Prueba de Barrio El Socorro, Color Blanco, primera medición*

	Promedio cd/lx/m²	p	F	Fc	Hipótesis	Comentario
Material Termoplástico	305	2,52445E-10	83,82	4,16	Se acepta H1	Los valores de retroreflectividad difieren significativamente entre los materiales evaluados, lo que indica que uno de ellos presenta un mejor desempeño en cuanto a capacidad retroreflectante
Pintura Plástico en Frío	250					
Pintura Plástico en Frío	199	1,18658E-05	27,11	4,16	Se acepta H1	
Pintura Solvente	250					
Material Termoplástico	305	0,000386976	15,96	4,17	Se acepta H1	
Pintura Solvente	250					

Tabla 32 *Análisis estadístico de la variabilidad de la desviación en el paño de Prueba de Barrio El Socorro, Color Amarillo, primera medición*

Material	Promedio cd/lx/m²	p	F	Fc	Hipótesis	Comentario
Material Termoplástico	290	6,5502E-11	306,02	4,60	Se acepta H1	Los valores de retrorreflectividad difieren significativamente entre los materiales evaluados, lo que indica que uno de ellos presenta un mejor desempeño en cuanto a capacidad retrorreflectante
Pintura Plástico en Frío	114					
Pintura Plástico en Frío	114	9,6505E-11	248,35	4,54	Se acepta H1	
Pintura Solvente	300					
Material Termoplástico	290	0,53816711	0,40	4,67	Se acepta H0	Los promedio de la retrorreflectividad son similares entre la pintura solvente y el material termoplástico.
Pintura Solvente	300					

Nota: En el Apéndice I se incluye el detalle completo del cálculo del ANOVA, ejecutado con el programa Excel.

Tabla 33 Análisis estadístico de la variabilidad de la desviación en el paño de Prueba de Barrio El San Francisco, Color blanco, primera medición

Material	Promedio cd/lx/m²	p	F	Fc	Hipótesis	Comentario
Pintura Plástico en Frío	203	0,00067213	14,185	4,149	Se acepta H1	Los valores de retroreflectividad difieren significativamente entre los materiales evaluados, lo que indica que uno de ellos presenta un mejor desempeño en cuanto a capacidad retroreflectante
Pintura Solvente	236					
Material Termoplástico	344	4,8091E-15	177,260	4,130	Se acepta H1	
Pintura Plástico en Frío	203					
Material Termoplástico	344	2,3675E-11	94,586	4,130	Se acepta H1	
Pintura Solvente	236					

Tabla 34 Análisis estadístico de la variabilidad de la desviación en el paño de Prueba de Barrio El San Francisco, Color Amarillo, primera medición

Material	Promedio cd/lx/m²	p	F	Fc	Hipótesis	Comentario
Material Termoplástico	329	1,9549E-09	131,97	4,45	Se acepta H1	Los valores de retrorreflectividad difieren significativamente entre los materiales evaluados, lo que indica que uno de ellos presenta un mejor desempeño en cuanto a capacidad retrorreflectante
Pintura Plástico en Frío	133					
Pintura Plástico en Frío	133	8,0311E-11	223,51	4,49	Se acepta H1	
Pintura Solvente	263					
Material Termoplástico	329	0,00390735	11,60	4,54	Se acepta H1	
Pintura Solvente	263					

Tabla 35 Análisis estadístico de la variabilidad de la desviación en el paño de Prueba de Barrio María Auxiliadora Color blanco, primera medición

Material	Promedio cd/lx/m ²	p	F	Fc	Hipótesis	Comentario
Material Termoplástico	337	4,5221E-10	92,93	4,23	Se acepta H1	Los valores de retroreflectividad difieren significativamente entre los materiales evaluados, lo que indica que uno de ellos presenta un mejor desempeño
Pintura Plástico en Frío	236					
Pintura Plástico en Frío	236	0,0806014	3,29	4,20	Se acepta H0	

Pintura Solvente	255					en cuanto a capacidad retroreflectante
Material Termoplástico	337	3,3407E-08	56,71	4,20	Se acepta H1	
Pintura Solvente	255					

Tabla 36 Análisis estadístico de la variabilidad de la desviación en el paño de Prueba de Barrio María Auxiliadora Color amarillo, primera medición

Material		Promedio cd/lx/m²	p	F	Fc	Hipótesis	Comentario
Material Termoplástico	242		6,92E-10	187,73	4,54	Se acepta H1	Los valores de retroreflectividad difieren significativamente entre los materiales evaluados, lo que indica que uno de ellos presenta un mejor desempeño en cuanto a capacidad retroreflectante
Pintura Plástico en Frío	120						
Pintura Plástico en Frío	120		1,8021E-06	66,57	4,67	Se acepta H1	
Pintura Solvente	195						
Material Termoplástico	242		5,6323E-05	36,78	4,75	Se acepta H1	
Pintura Solvente	195						

Tabla 37 Análisis estadístico de la variabilidad de la desviación en el paño de Prueba de Barrio María Auxiliadora Arriba-Abajo, color amarillo, primera medición

Material	Promedio cd/lx/m²	p	F	Fc	Hipótesis	Comentario
Material Termoplástico	290	8,0821E-14	216,53	4,24	Se acepta H1	Los valores de retroreflectividad entre los materiales son diferentes, uno de los dos materiales tiene mejor retroreflectividad que otro
Pintura Plástico en Frío	104					
Pintura Plástico en Frío	104	2,0573E-07	43,27	4,15	Se acepta H1	
Pintura Solvente	149					
Material Termoplástico	290	1,5498E-11	113,43	4,18	Se acepta H1	
Pintura Solvente	149					

Una vez depurada la base de datos y confirmado, mediante el análisis ANOVA, que existen diferencias significativas en los valores de retrorreflectividad entre los materiales evaluados, se procedió con la representación gráfica de los resultados. Este recurso visual se utilizó con el propósito de facilitar una interpretación más clara, precisa y práctica del comportamiento de la retrorreflectividad a lo largo del tiempo.

Para el entendimiento de los gráficos se debe considerar lo siguiente:

- Los gráficos son independientes para cada paño de prueba con el fin de conservar la individualidad de los tramos evaluados y facilitar el análisis comparativo entre ellos.
- Los gráficos son independientes para cada color: amarillo y blanco.
- Las mediciones fueron organizadas de forma descendente, es decir, desde el valor de retrorreflectividad más alto hasta el más bajo. Esta disposición permite identificar de manera rápida los valores más altos.
- En cada gráfico se incluyen las tres fechas de medición establecidas en el protocolo experimental, así como los tres tipos de materiales analizados, con el fin de observar su evolución en el tiempo y poder fácilmente comparar los materiales.
- La **Medición 1** se realizó entre los 10 y 15 días posteriores a la aplicación de cada tipo de pintura demarcadora; la **Medición 2**, entre los 67 y 73 días ; y la **Medición 3**, entre los 196 y 204 días. Estas fechas fueron seleccionadas estratégicamente para evaluar el comportamiento inicial, intermedio y final del desempeño reflectivo bajo condiciones reales de servicio.
- En los gráficos se muestra las líneas de los valores mínimos de retrorreflectividad que debería haber alcanzado cada tipo de material según normativa, a continuación una tabla resumen de normativa.

Tabla 38 Resumen de valores mínimos de retrorreflectividad según normativa

Material	Retrorreflectividad mcd/m ² *lx		Norma	País de origen la norma
	Blanco	Amarillo		
Plástico en Frio, ruta terciaria	140	120	Norma NTC:47443:2023	Colombia
Solvente	250	200	INTE Q46:2021	Costa Rica
Termoplástico	300	250		

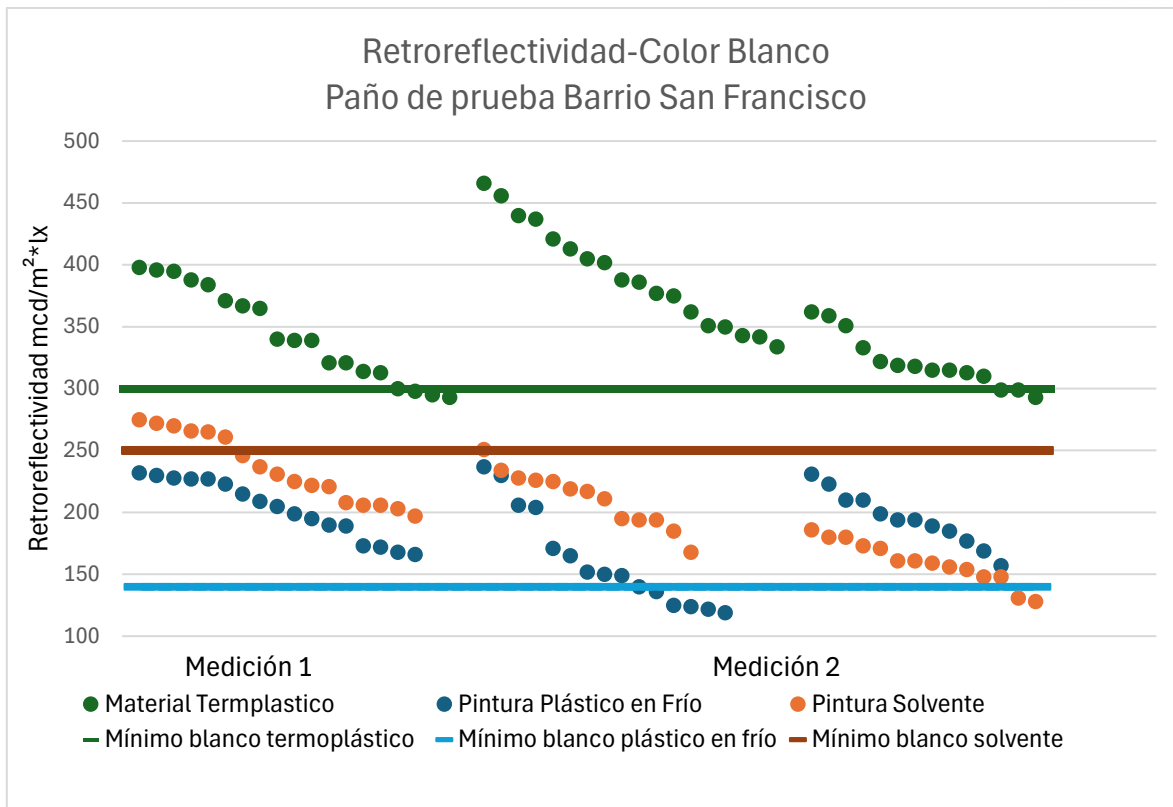


Figura 45 Desempeño Retrorreflectivo, barrio San Francisco, color blanco

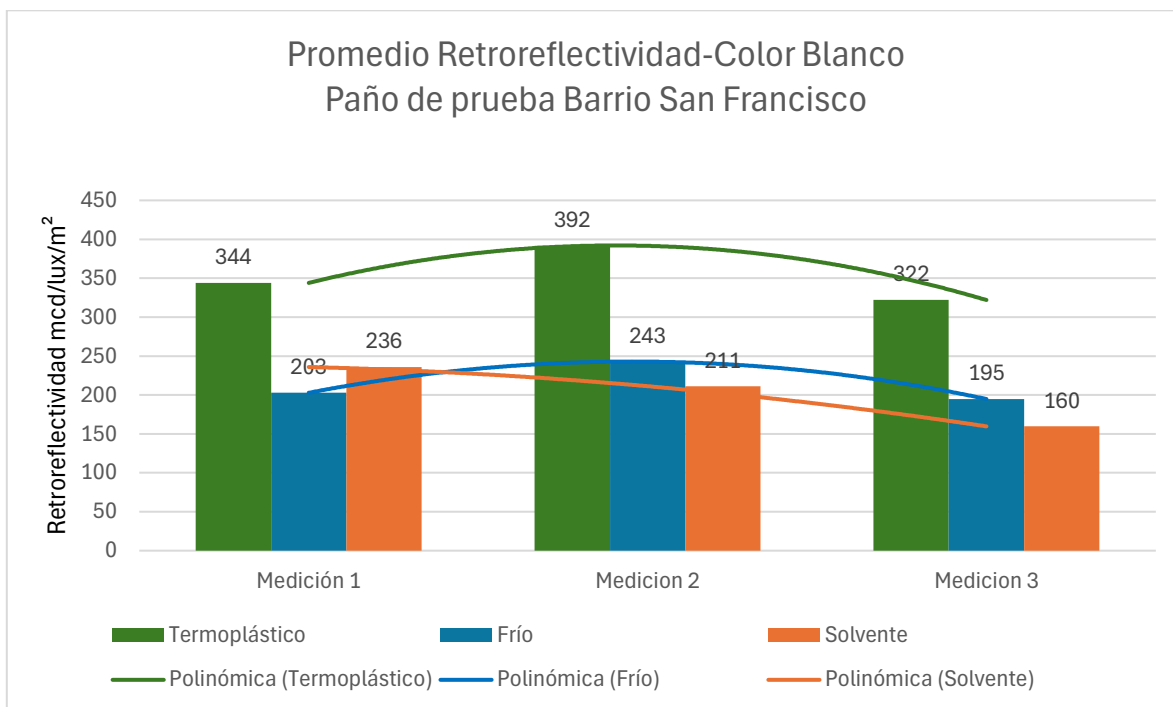


Figura46 Promedio de desempeño Retrorreflectivo, barrio San Francisco, color blanco

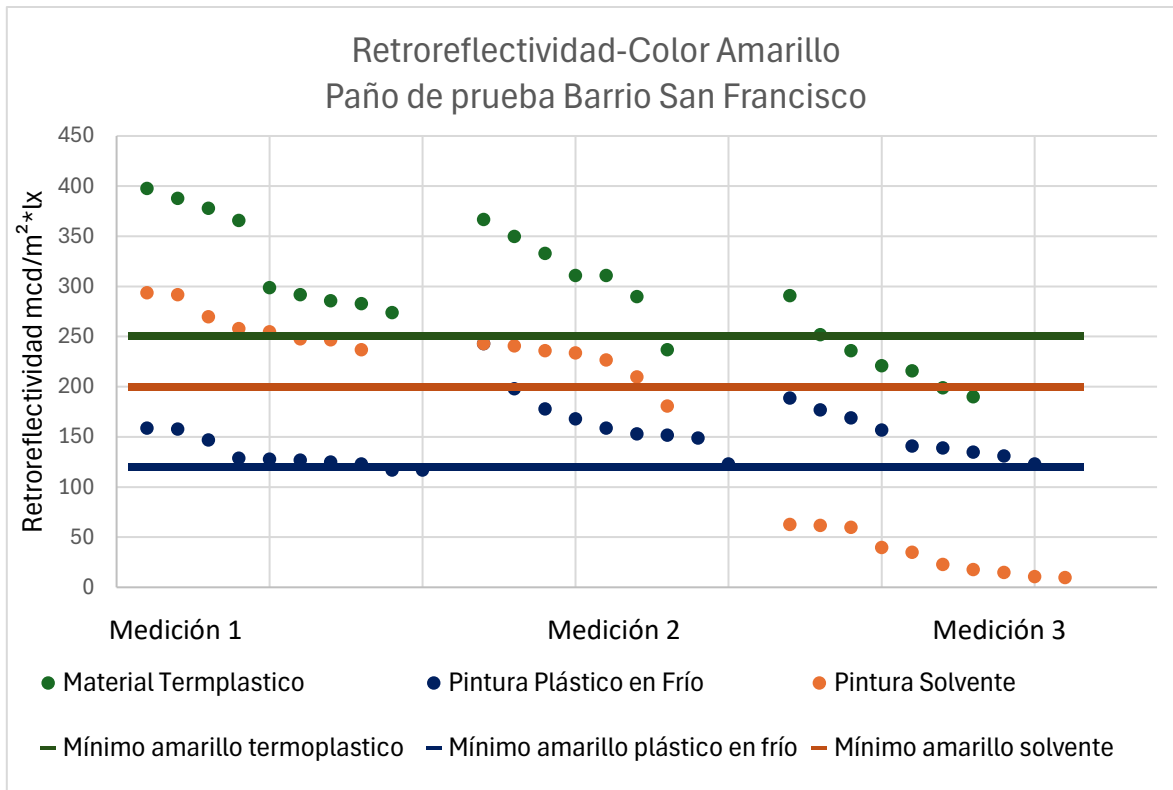


Figura 47 Desempeño Retroreflectivo barrio San Francisco, color amarillo

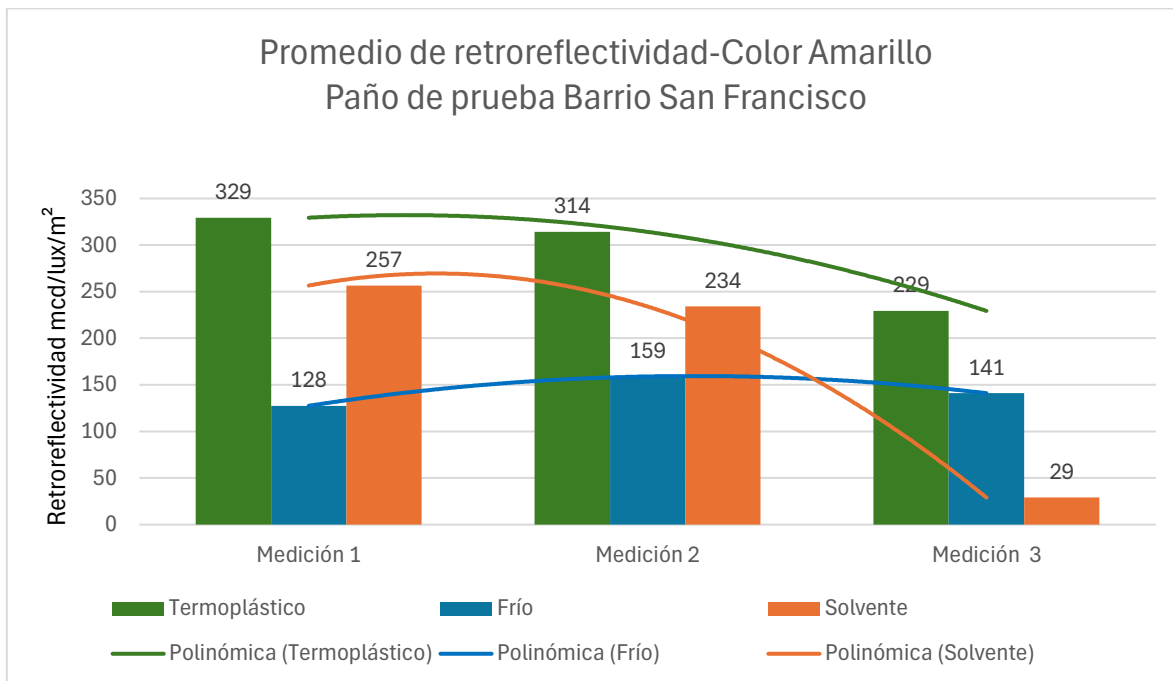


Figura 48 Promedio de desempeño Retroreflectivo barrio San Francisco, color amarillo

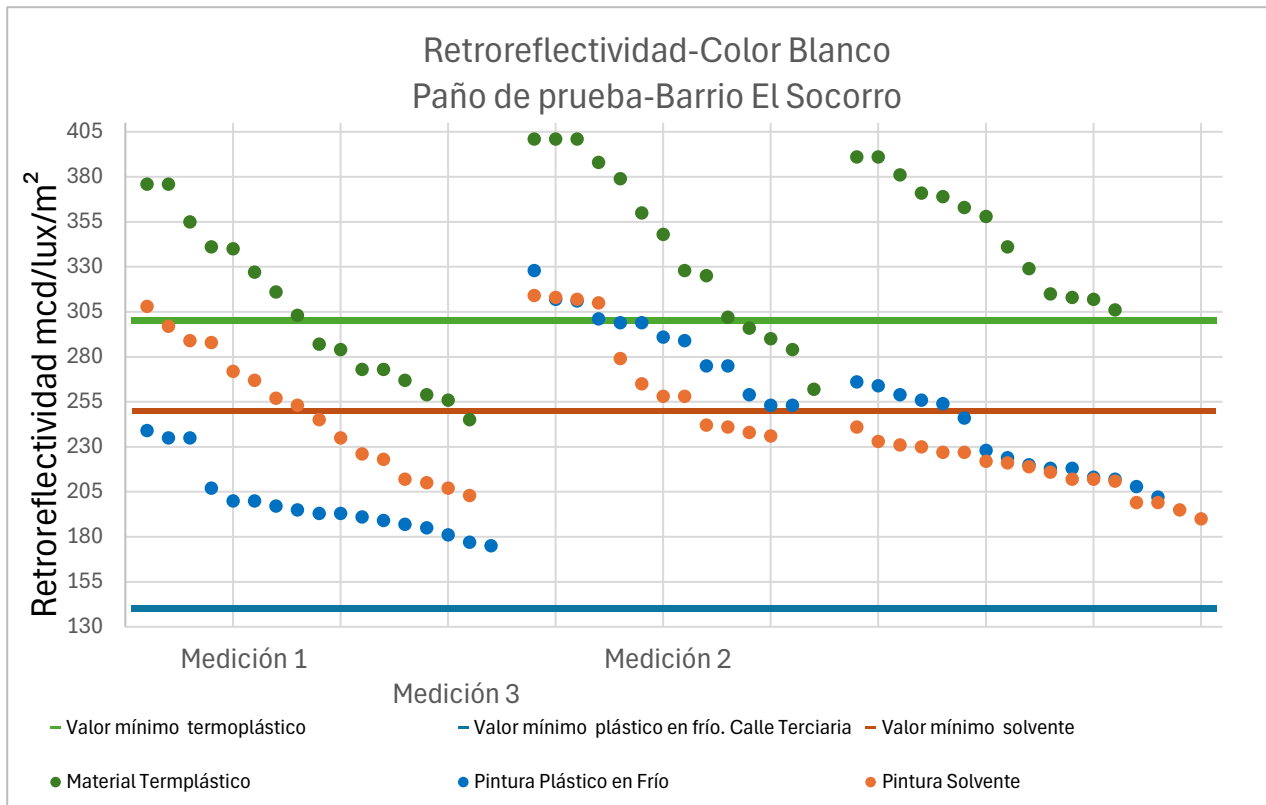


Figura 49 Desempeño Retrorreflectivo, barrio El Socorro, color blanco.

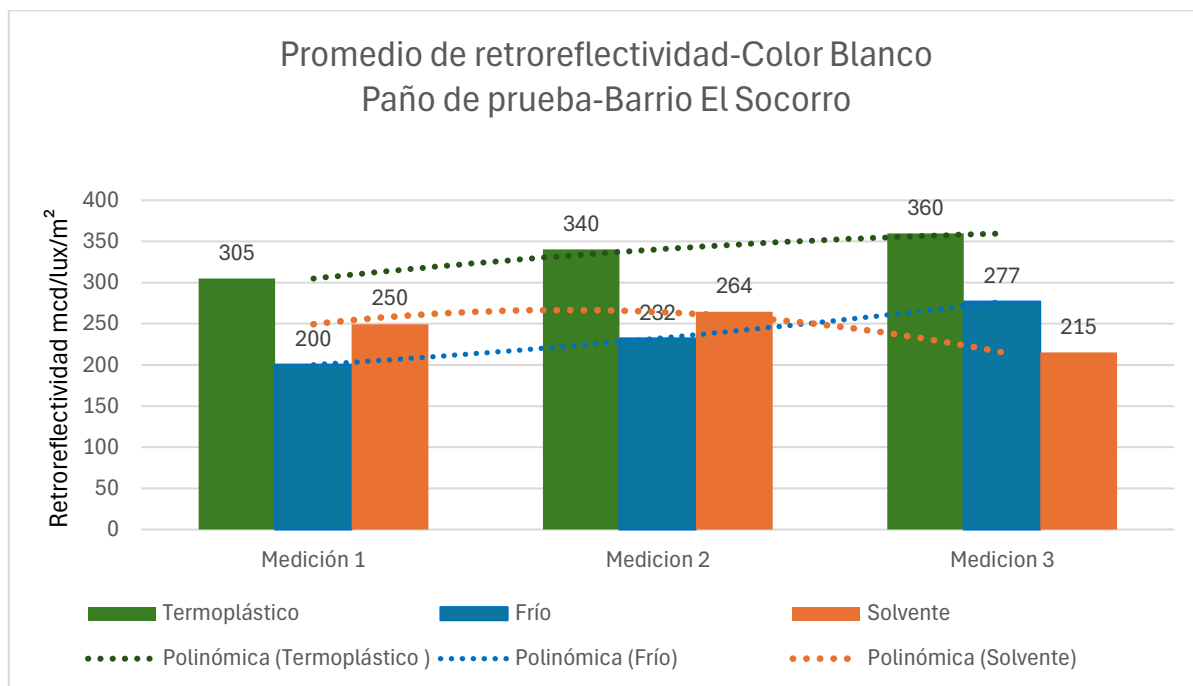


Figura 50 Promedio de desempeño retrorreflectivo, barrio El Socorro, color blanco

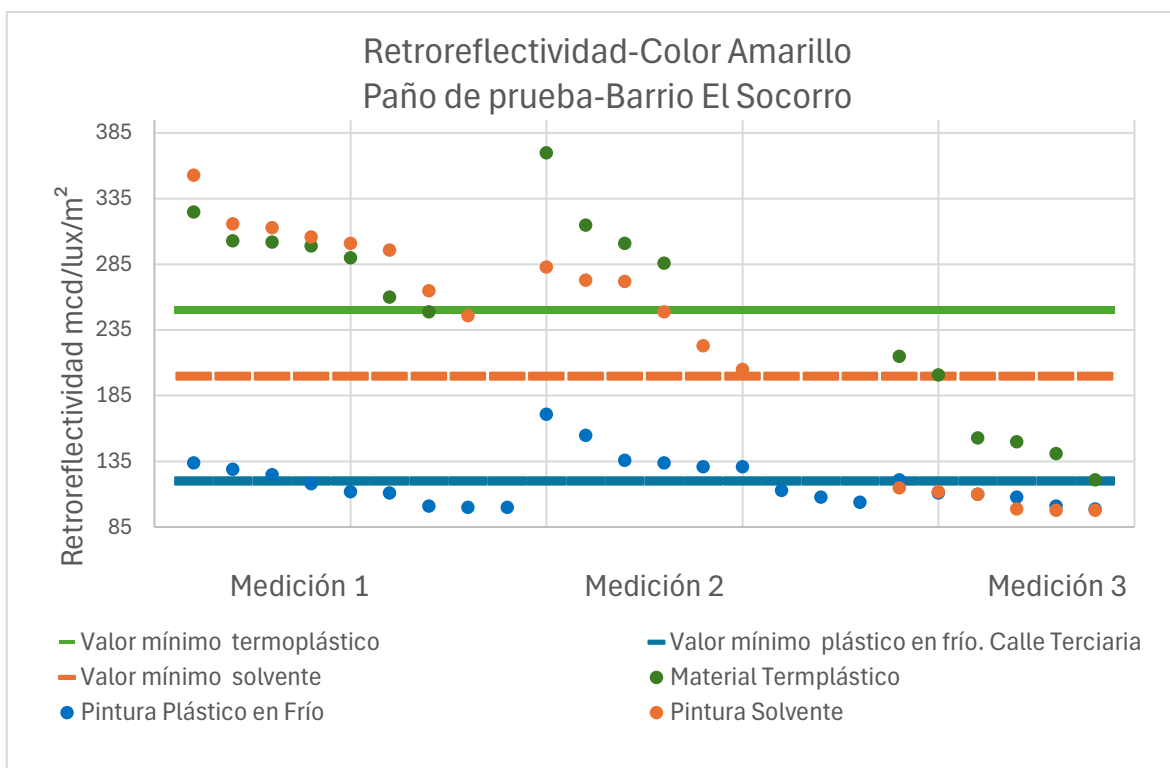


Figura 51 Desempeño Retrorreflectivo, barrio El Socorro, color amarillo

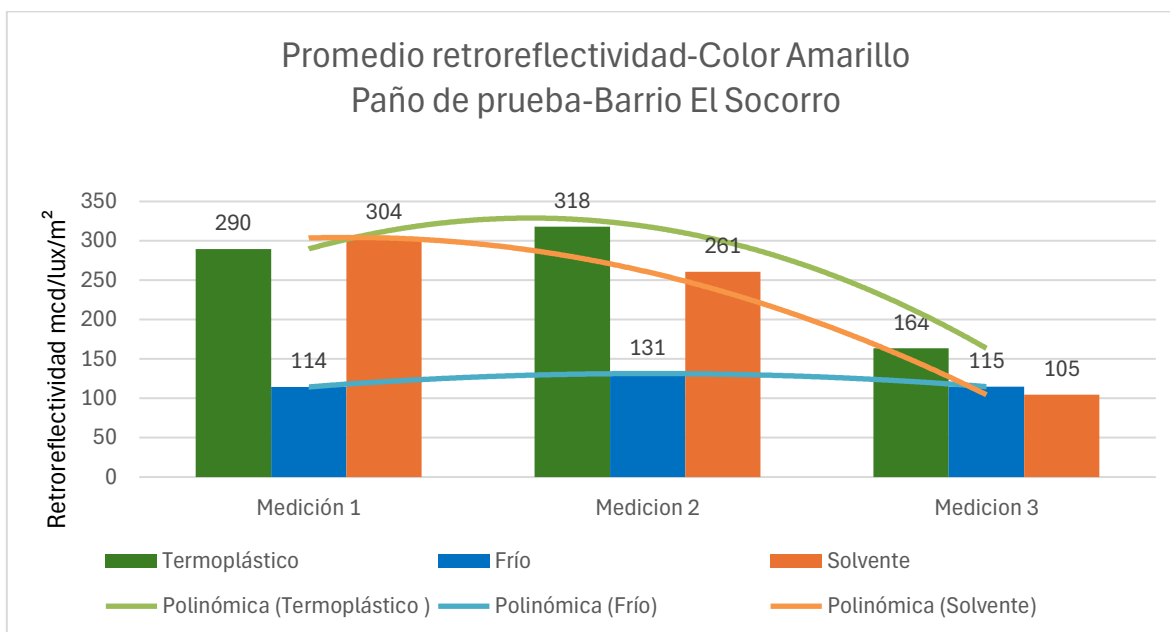


Figura 52 Promedio de desempeño retrorreflectivo, barrio El Socorro, color amarillo

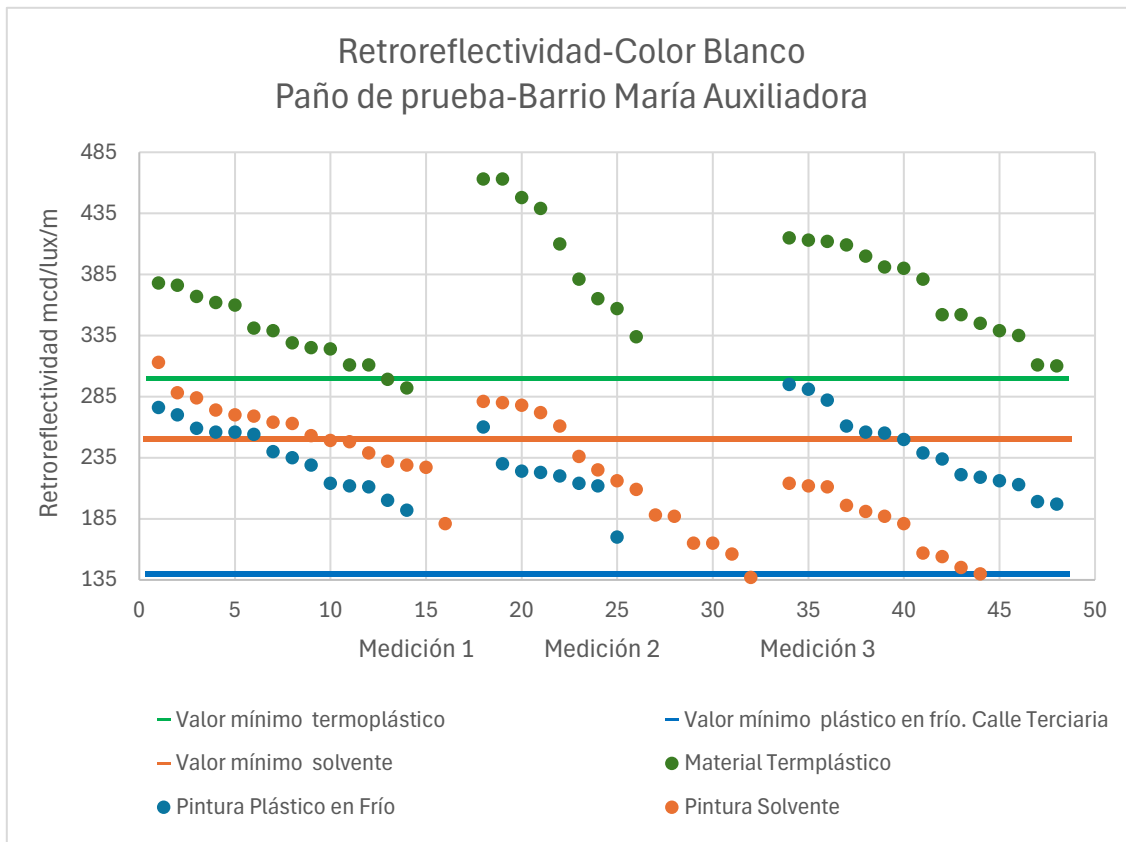


Figura 53 Desempeño Retrorreflectivo, barrio María Auxiliadora, color blanco.

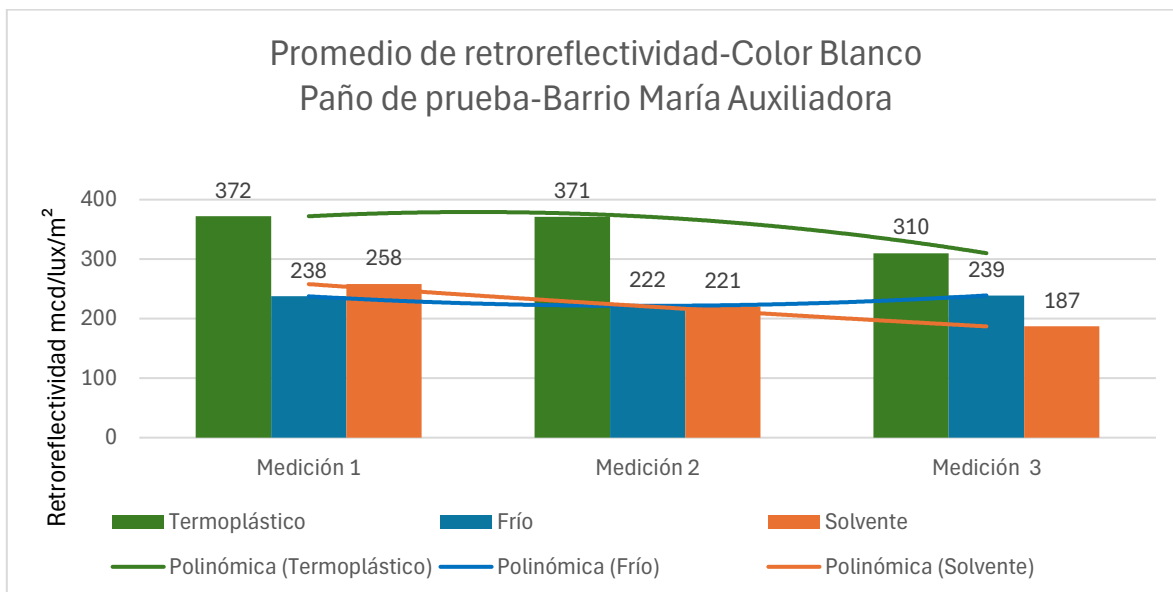


Figura 54 Promedio de desempeño Retrorreflectivo, barrio María Auxiliadora, color blanco.

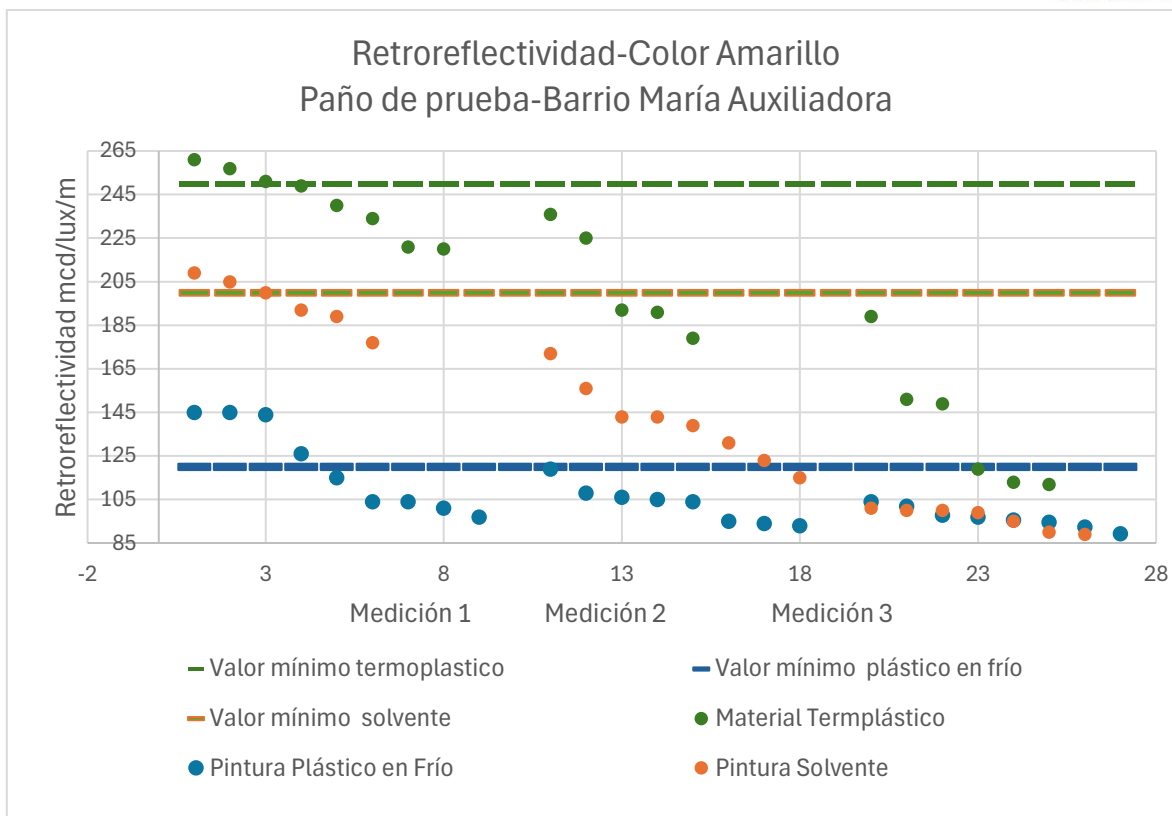


Figura 55 Desempeño Retrorreflectivo, barrio María Auxiliadora, color amarillo.

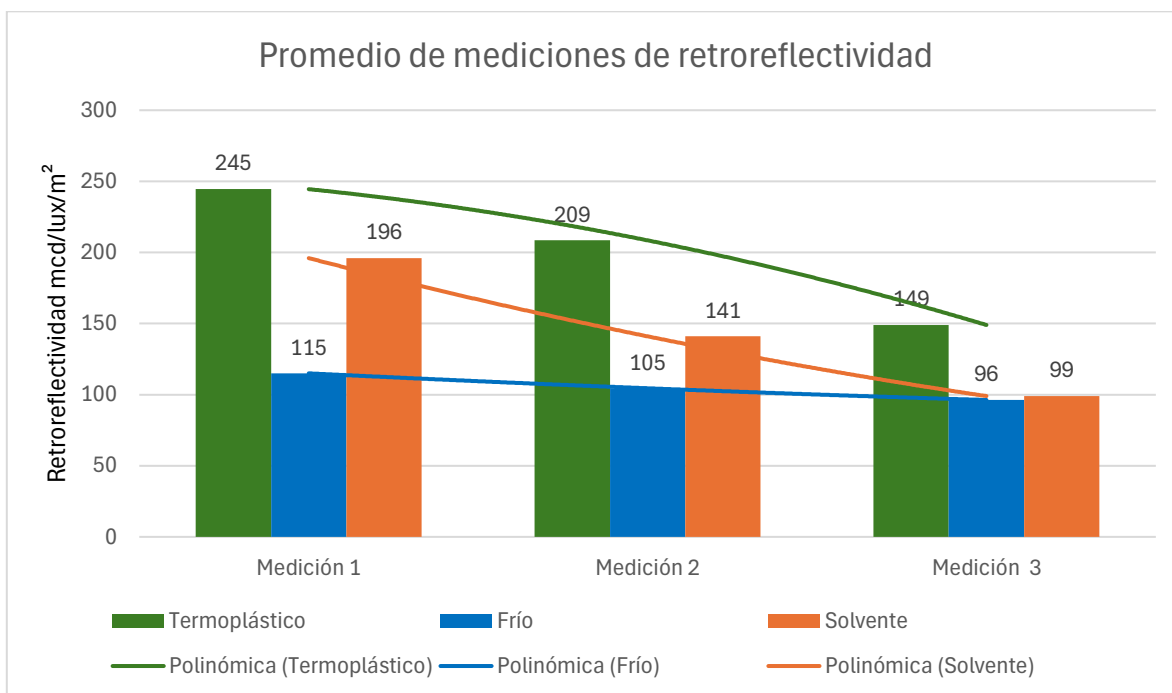


Figura 56 Promedio desempeño Retrorreflectivo, barrio María Auxiliadora, color amarillo

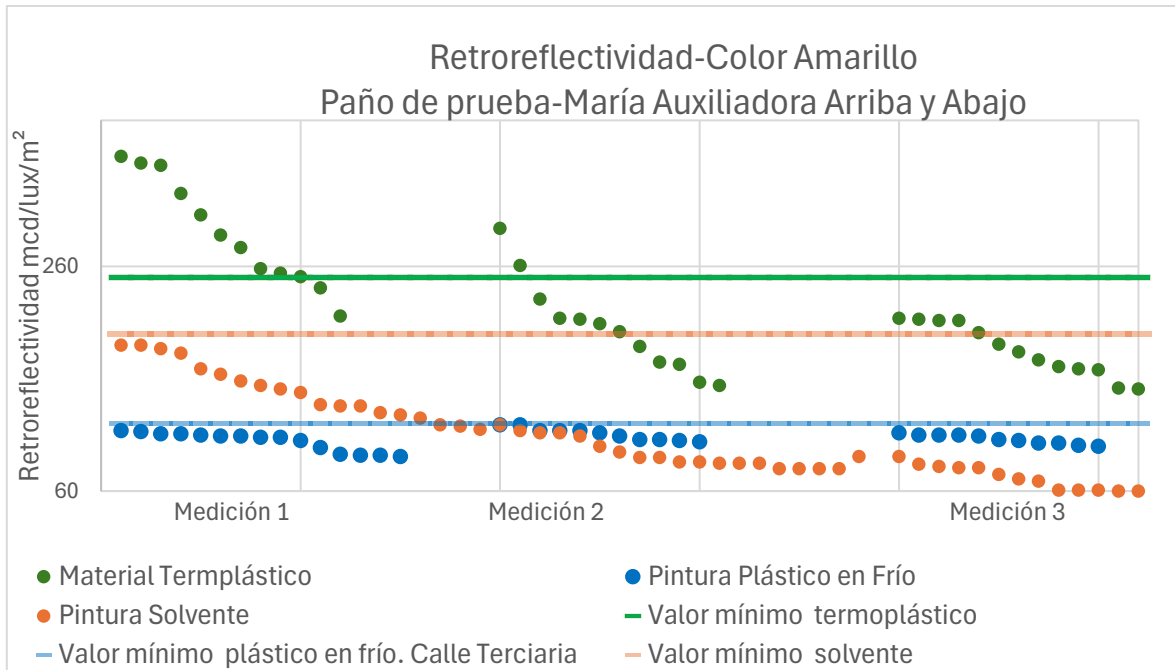


Figura 57 Desempeño Retroreflectivo, barrio María Auxiliadora Arriba y Abajo, color amarillo.

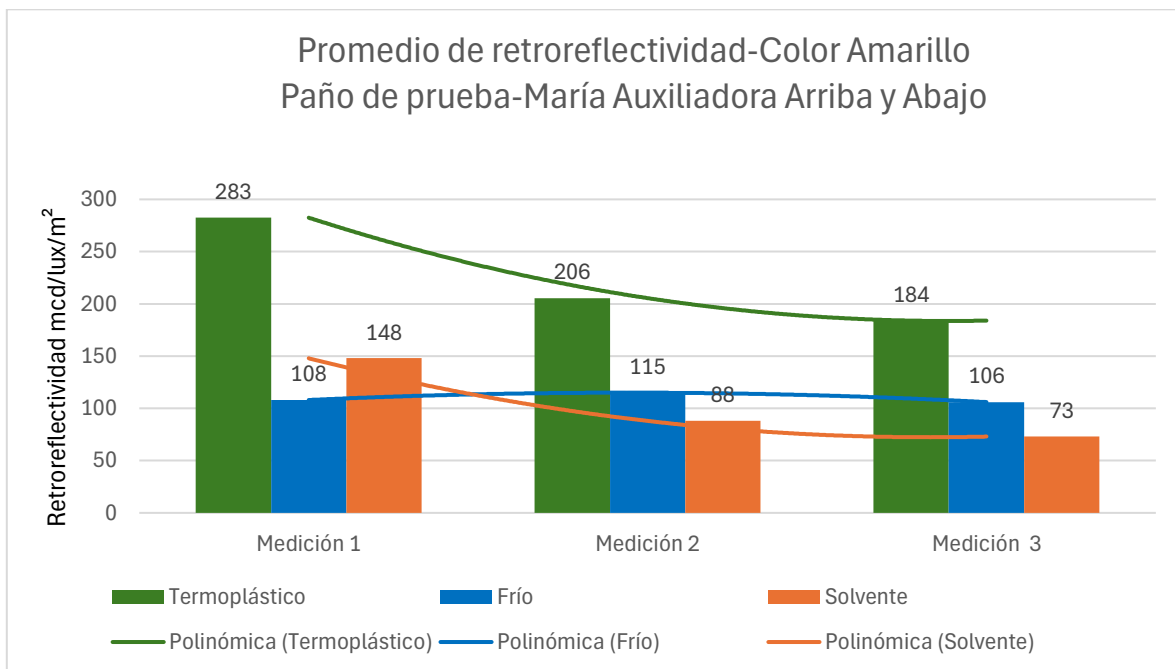


Figura 58 Promedio de desempeño Retroreflectivo, barrio María Auxiliadora Arriba y Abajo, color amarillo

Una vez definido los promedios de retroreflectividad de cada sitio de estudio en la primera y última medición, se calcula cuanto porcentaje de retroreflectividad se ha perdido. En las siguientes tablas se presentan estos resultados.

Tabla 39 *Pérdida de la retroreflectividad Barrio San Francisco*

Paño de Prueba Barrio San Francisco		
Tipo de demarcación	Pérdida de retroreflectividad (%)	
	Color Blanco	Color Amarillo
Material Termoplástico	7	26
Pintura Plástico en Frío	5	0
Pintura Solvente	31	89

Tabla 40 *Pérdida de la retroreflectividad Barrio Socorro*

Paño de Prueba Barrio Socorro		
Tipo de demarcación	Pérdida de retroreflectividad (%)	
	Color Blanco	Color Amarillo
Material Termoplástico	0	49
Pintura Plástico en Frío	0	1
Pintura Solvente	12	66

Tabla 41 *Pérdida de la retroreflectividad Barrio María Auxiliadora*

Paño de Prueba Barrio María Auxiliadora		
Tipo de demarcación	Pérdida de retroreflectividad (%)	
	Color Blanco	Color Amarillo
Material Termoplástico	0	39
Pintura Plástico en Frío	0	16
Pintura Solvente	28	49

Tabla 42 *Pérdida de la retroreflectividad Barrio María Auxiliadora Arriba-Abajo*

Paño de Prueba Barrio María Auxiliadora Arriba-Abajo		
Tipo de demarcación	Pérdida de retroreflectividad (%)	
	Color Amarillo	
Material Termoplástico	35	
Pintura Plástico en Frío	2	
Pintura Solvente	51	

Tabla 43 Recuento de Pérdida de la retroreflectividad- Color Blanco

Tipo de demarcación	Pérdida de retroreflectividad (%)		
	Color Blanco		
	Paño de Prueba Barrio San Francisco	Paño de Prueba Barrio Socorro	Paño de Prueba Barrio María Auxiliadora
Material Termoplástico	7	0	0
Pintura Plástico en Frío	5	0	0
Pintura Solvente	31	12	28

Tabla 44 Recuento de Pérdida de la retroreflectividad- Color Amarillo

Tipo de demarcación	Pérdida de retroreflectividad (%)			
	Color Amarillo			
	Paño de Prueba Barrio San Francisco	Paño de Prueba Barrio Socorro	Paño de Prueba Barrio María Auxiliadora	Paño de Prueba Barrio María Auxiliadora Arriba- Abajo
Material Termoplástico	26	49	39	35
Pintura Plástico en Frío	0	1	16	2
Pintura Solvente	89	66	49	51

En el transcurso de esta investigación se identificó la ejecución de trabajos de demarcación vial utilizando pintura plástica en frío en el cantón de Vázquez de Coronado, en rutas cantonales, en donde se demarcó la línea centro. En dicho proyecto se ha implementado un control de calidad a través de mediciones de retrorreflectividad. Debido a que se tuvo acceso a dicha información técnica, se ha considerado pertinente su incorporación en la presente investigación, con el fin de documentar y analizar su comportamiento. Esta información cuenta con la limitante de desconocer las condiciones ambientales, topografía del sitio, condición de la superficie, entre otros factores que pueden influenciar la demarcación, a pesar de esta limitante los valores de retrorreflectividad rondan el rango de 250 a 350 mcd/lux/m2.

Las evaluaciones de retrorreflectividad se llevaron a cabo dentro de un intervalo de entre 5 y 15 días posteriores a la aplicación de la pintura, permitiendo valorar el desempeño inicial del material en condiciones reales de servicio.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos, los cuales se ilustran mediante el siguiente gráfico.

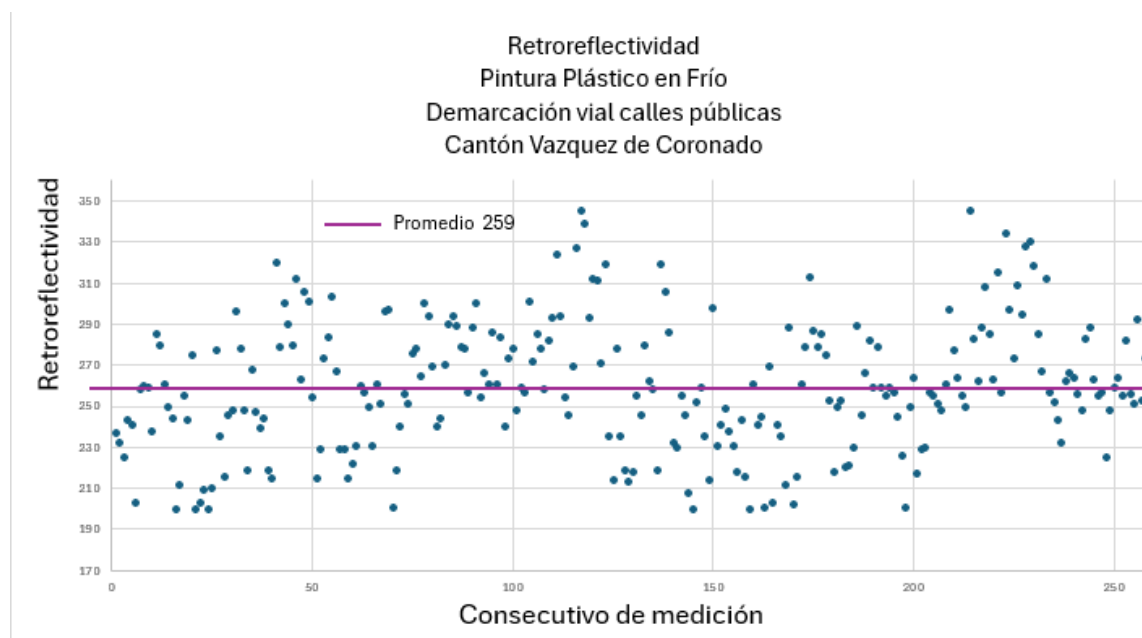


Figura 59 Resultados de medición de retroreflectividad en el Cantón de Vázquez de Coronado (NO es un paño de prueba).

4.7 Adherencia y desgaste de la demarcación vial horizontal

Para la evaluación del desgaste de cada tipo de demarcación se presenta a continuación, el registro de datos obtenidos en campo que evidencian el porcentaje de material de demarcación que permanece adherido a la superficie de la calzada. En la sección 3.3.2 se detalla la metodología con la que se obtuvo los datos.

La siguiente tabla permite la identificación de patrones de deterioro y la cuantificación del porcentaje área que aún permanece.

Tabla 45 Porcentaje de adherencia de pintura y material termoplástico a la superficie

Sitio de estudio	Color	Tipo de línea	Tipo de material	Fecha de primera medición	Fecha de segunda medición
				6/10/2024	15/3/2025
				% de material adherido	
San Francisco	Blanco	Transversal	Plástico en frío	100	100
San Francisco	Blanco	Transversal	Solvente	100	70
San Francisco	Blanco	Transversal	Termoplástica	100	100
San Francisco	Amarillo	Longitudinal	Plástico en frío	100	100

San Francisco	Amarillo	Longitudinal	Solvente	75	25
San Francisco	Amarillo	Longitudinal	Termoplástica	100	100
San Francisco	Blanco	Longitudinal	Plástico en frío	100	100
San Francisco	Blanco	Longitudinal	Solvente	85	80
San Francisco	Blanco	Longitudinal	Termoplástica	100	100
Barrio Socorro	Blanco	Transversal	Plástico en frío	100	100
Barrio Socorro	Blanco	Transversal	Solvente	100	85
Barrio Socorro	Blanco	Transversal	Termoplástica	100	100
Barrio Socorro	Amarillo	Longitudinal	Plástico en frío	100	100
Barrio Socorro	Amarillo	Longitudinal	Solvente	80	75
Barrio Socorro	Amarillo	Longitudinal	Termoplástica	100	100
Barrio Socorro	Blanco	Longitudinal	Plástico en frío	100	100
Barrio Socorro	Blanco	Longitudinal	Solvente	100	85
Barrio Socorro	Blanco	Longitudinal	Termoplástica	100	100
Barrio María Auxiliadora	Blanco	Transversal	Plástico en frío	95	85
Barrio María Auxiliadora	Blanco	Transversal	Solvente	90	65
Barrio María Auxiliadora	Blanco	Transversal	Termoplástica	100	100
Barrio María Auxiliadora	Amarillo	Longitudinal	Plástico en frío	100	95
Barrio María Auxiliadora	Amarillo	Longitudinal	Solvente	85	75
Barrio María Auxiliadora	Amarillo	Longitudinal	Termoplástica	100	100
Barrio María Auxiliadora	Blanco	Longitudinal	Plástico en frío	100	100
Barrio María Auxiliadora	Blanco	Longitudinal	Solvente	95	85
Barrio María Auxiliadora	Blanco	Longitudinal	Termoplástica	100	100
Barrio María Auxiliadora Arriba	Amarillo	Longitudinal	Plástico en frío	100	100
Barrio María Auxiliadora Arriba	Amarillo	Longitudinal	Solvente	75	65
Barrio María Auxiliadora Arriba	Amarillo	Longitudinal	Termoplástica	100	100
Auxiliadora Abajo	Amarillo	Longitudinal	Plástico en frío	100	100
Auxiliadora Abajo	Amarillo	Longitudinal	Solvente	85	85
Auxiliadora Abajo	Amarillo	Longitudinal	Termoplástica	100	100

Promedio de Porcentaje de adherencia de pintura y material termoplástico a la superficie en el paño de prueba de barrio María Auxiliadora Arriba/Abajo = x75

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Una vez tabulado la data se somete a estudio de análisis de varianza para definir si las medias obtenidas entre los diferentes tipos de material son diferentes, para esto se aplica un factor de confianza de 95% o sea $\alpha=0,05$.

Se tienen las dos hipótesis típicas.

H0: los promedios del desprendimiento de los materiales son iguales.

H1: los promedios del desprendimiento de los materiales NO son iguales

Para obtener la varianza se utiliza el programa Excel, al cual se le sube todos los datos que se necesita analizar. Ver el apéndice I.

Análisis de la primera medición:

Ver Apéndice J

Este análisis se realizó en Excel y se obtuvieron los siguientes datos.

Promedio para pintura plástico en frío: 100

Promedio para pintura base solvente: 88

Promedio para material termoplástico: 100

$\alpha=0,05$

$P=Probabilidad = 0,0000256$

$F=15,34$ y

Valor crítico para $F_c = 5,39$

Hay dos condiciones

Rechazar H0 si $p < \alpha$ y para comprobar rechazar H0 si $F > F_c$

P es 0.0000256 y es menor que α entonces se rechaza H0

F es 15.34 por lo que es mayor que F_c que es 5.39 y se rechaza H0

Al cumplirse estas dos condiciones se rechaza H0 y se acepta H1 lo que significa que los promedios de las mediciones de desprendimiento de las demarcaciones NO son iguales.

Análisis de la segunda medición:

Ver Apéndice J

Este análisis se realizó en Excel y se obtuvieron los siguientes datos.

Promedio para pintura plástico en frío: 98

Promedio para pintura base solvente: 72,7

Promedio para material termoplástico: 100

$\alpha=0,05$

$P=Probabilidad = 0,000000870$

$F=23,03$ y

Valor crítico para $F_c = 3,32$

Hay dos condiciones

Rechazar H_0 si $p < \alpha$ y para comprobar rechazar H_0 si $F > F_c$

P es 0.000000870 y es menor que α entonces se rechaza H_0

F es 23,03 por lo que es mayor que F_c que es 3,32 y se rechaza H_0

Al cumplirse estas dos condiciones se rechaza H_0 y se acepta H_1 lo que significa que los promedios de las mediciones de desprendimiento de las demarcaciones NO son iguales

A partir de análisis estadístico se ha logrado identificar que los valores de desprendimiento para los tres tipos de materiales NO son similares, siendo algunos materiales más propensos a presentar mayores pérdidas que otros.

En el Apéndice A se presentan las fotografías de la evaluación visual a partir de las cuales se ha definido el porcentaje de área con demarcación adherida a la superficie.

Otro factor evaluado mediante auscultación visual es el desempeño de la demarcación en distintas condiciones de la superficie de rodadura, considerando que la adherencia de los materiales varía según las características del pavimento. En el Apéndice B se ubican fotografías de esta evaluación visual a partir de las cuales se logra diferenciar que la pintura plástico en frío y base solvente se moldea a las irregularidades de la superficie mientras que la termoplástico no lo hace, esto genera espacios vacíos y fracturamiento de la membrana de material.

4.8 Resistencia al deslizamiento o fricción de la demarcación vial horizontal

En el apéndice C se encuentran imágenes capturadas durante la medición de la resistencia al deslizamiento.

A continuación, se presenta la tabla de resultados obtenidos in situ, correspondientes a los valores de fricción medidos mediante el Péndulo Británico para cada tramo, tipo de material y color de demarcación evaluado.

Tabla 46 *Medición de la Resistencia al Deslizamiento con Péndulo Británico*

Sitio de estudio	Color	Tipo de Demarcación	BPN
Socorro	Blanco	Termoplástico	20
Socorro	Amarillo	Termoplástico	34
Socorro	Blanco	Termoplástico	28
Socorro	Amarillo	Termoplástico	35
Socorro	Amarillo	Plástico en Frío	33
Socorro	Amarillo	Plástico en Frío	35
Socorro	Blanco	Plástico en Frío	20
Socorro	Blanco	Plástico en Frío	30
Varios paños de prueba	Blanco	Solvente	33
Varios paños de prueba	Amarillo	Solvente	20
Varios paños de prueba	Blanco	Solvente	33
Varios paños de prueba	Amarillo	Solvente	25
San Francisco	Amarillo	Termoplástico	25
San Francisco	Blanco	Termoplástico	20
San Francisco	Amarillo	Termoplástico	31
San Francisco	Blanco	Termoplástico	27
San Francisco	Amarillo	Plástico en Frío	31
San Francisco	Amarillo	Plástico en Frío	26
San Francisco	Blanco	Plástico en Frío	22
San Francisco	Blanco	Plástico en Frío	36
Barrio María Auxiliadora	Blanco	Plástico en Frío	25
Barrio María Auxiliadora	Blanco	Plástico en Frío	32
Barrio María Auxiliadora	Blanco	Termoplástico	30
Barrio María Auxiliadora	Amarillo	Termoplástico	23
Barrio María Auxiliadora	Amarillo	Termoplástico	31
Barrio María Auxiliadora	Blanco	Termoplástico	22
Barrio María Auxiliadora	Amarillo	Plástico en Frío	29
Barrio María Auxiliadora	Amarillo	Plástico en Frío	27

ANALISIS ESTADÍSTICO

v Una vez tabulado la data se somete a estudio de análisis de varianza para definir si las medias obtenidas entre los diferentes tipos de material son diferentes, para esto se aplica un factor de confianza de 95% o sea $\alpha=0.05$

Se tienen las dos hipótesis típicas

H0: El promedio de los valores de fricción (valores BPN) de los tres materiales son iguales

H1: El promedio de los valores de fricción (valores BPN) de los tres materiales NO son iguales

Este análisis se realizó en Excel y se obtuvieron los siguientes datos.

$$\alpha=0,05$$

$$P=\text{Probabilidad} = 0,74$$

$$F=0,30 \text{ y}$$

$$\text{Valor crítico para } F_c = 3,39$$

Hay dos condiciones

Rechazar H0 si $p < \alpha$ y para comprobar rechazar H0 si $F > F_c$

P es 0.74 y es mayor que α entonces se acepta H0

F es 0.30 por lo que es menor que F_c que es 3,39

Por estas dos condiciones se acepta H0 que significa que las medias poblacionales son iguales, o al menos muy parecidas.

A partir de análisis estadístico se ha logrado identificar que los valores promedio de BPN para los tres tipos de materiales son similares, lo que indica que ninguno de ellos muestra una capacidad de fricción sustancialmente superior en comparación con los otros.

En la siguiente tabla se muestra los promedios de la resistencia al deslizamiento (BPN) para cada tipo de demarcación y para cada color

Tabla 47 Promedios de valores de BPN para cada tipo de demarcación y para cada color

Sitio de estudio	Color	Tipo de material	BNP. Dato medido en sitio	Promedio	Promedio por color	
					Amarillo	Blanco
Socorro	Amarillo	Plástico en Frío	34	28,83	30,17	27,50
Socorro	Blanco		25			
San Francisco	Amarillo		28,5			
San Francisco	Blanco		29			

Sitio de estudio	Color	Tipo de material	BNP.	Promedio	Promedio por color	
			Dato medido en sitio		Amarillo	Blanco
Barrio María Auxiliadora	Amarillo		28			
Barrio María Auxiliadora	Blanco		28,5			
Socorro	Amarillo	Termoplástico	34,5	27,17	29,83	24,50
Socorro	Blanco		24			
San Francisco	Amarillo		28			
San Francisco	Blanco		23,5			
Barrio María Auxiliadora	Amarillo		27			
Barrio María Auxiliadora	Blanco		26			
Paños de prueba varios	Amarillo	Solvente	33	27,75	33,00	22,50
Paños de prueba varios	Blanco		22,5			

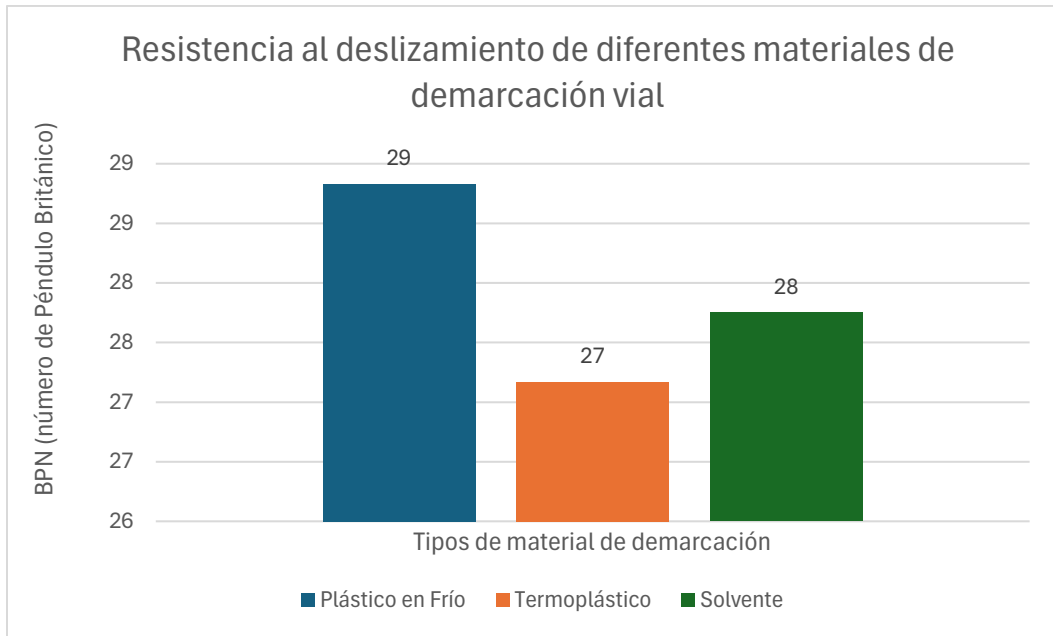


Figura 60 Resistencia al deslizamiento de diferentes tipos de material de demarcación vial

4.9 Estudio de viabilidad económica de la demarcación con pintura plástico en frío y comparación de precios con pintura base solvente y material termoplástico en Costa Rica

El costo por metro lineal de demarcación vial se encuentra influenciado por una serie de variables técnicas y logísticas. Entre las principales se incluyen: los gastos asociados a la movilización de cuadrillas de trabajo, el volumen total de demarcación requerido (expresado en metros lineales), la tipología específica de la demarcación (línea continua, discontinua, símbolos, entre otros), así como las condiciones particulares del entorno vial, como el nivel de tránsito vehicular, la topografía y la dificultad del acceso a la zona de trabajo.

En SICOP, se logró encontrar dos contrataciones por servicios de demarcación con pintura plástico en frío. Para la pintura solvente y termoplástica se encontró mayor cantidad de procesos de contratación.

Contratación 1: demarcación vial con pintura plástico en frío

El primer proceso corresponde al expediente número **2024LD-000059-0025000001**

Resumen de información recopilada:

- **Objeto contractual:** Prestación de servicios de mano de obra, suministro de materiales, herramientas y maquinaria necesarias para la ejecución de demarcación vial de línea centro continua, utilizando pintura termoplástica o pintura plástica en frío, en diversas vías del cantón de Vázquez de Coronado. Esta intervención se enmarca en las actividades de mantenimiento periódico y rutinario, con el objetivo de mejorar la seguridad vial y peatonal.
- **Cantidad de metros lineales a contratar:** 7,000 metros.
- **Estudio de mercado:** Como parte del proceso, el ente contratante incorporó un estudio de mercado con el fin de determinar un rango presupuestario de referencia para esta

contratación. Dicho estudio se construyó a partir de cotizaciones obtenidas de distintos oferentes especializados en servicios de demarcación vial.

A continuación, se detallan los montos correspondientes a cada tipo de demarcación cotizada en el estudio de mercado del expediente 2024LD-000059-0025000001:

Tabla 48 Precios del estudio de mercado de proceso 2024LD-000059-0025000001

Cotización	Tipo de demarcación	Color de la demarcación	Unidad de medida	Costo Unitario
Cotización 1	Plástico en Frío	Amarillo	metro	₡ 1200
		Blanco	metro	₡ 1200
Cotización 2	Material Termoplástico	Amarillo	metro	₡ 1700
		Blanco	metro	₡ 1700
Cotización 3	Material Termoplástico	Amarillo	metro	₡ 1350
		Blanco	metro	₡ 1350

Fuente: estudio de mercado contratación 2024LD-000059-0025000001, SICOP.

En este proceso de contratación pública (2024LD-000059-0025000001), se recibieron tres ofertas por parte de empresas proveedoras del servicio de demarcación vial. Cada oferente propuso un tipo específico de pintura.

A continuación, se detallan las características principales de cada oferta, incluyendo el tipo de pintura ofertada y el monto unitario por metro lineal:

Tabla 49 Precios y tipo de material ofertados para la contratación 2024LD-000059-0025000001

Oferente	Tipo de pintura	Color	Monto	Unidad de medida	Empresa que cotiza
Oferente 1	Plástico en frío	Blanco/amarillo	₡850	metro	Mecsa
Oferente 2	Termoplástico	Blanco/amarillo	₡1015	metro	Bela Consultores S.A.
Oferente 3	Termoplástico	Blanco/amarillo	₡1250	metro	Publivías

Contratación 2: demarcación vial con pintura plástico en frío

El segundo proceso corresponde al expediente número **2024LE-000013-0004611901**

Resumen de información recopilada:

- **Objeto contractual:** Contratación para la demarcación horizontal y vertical de algunas rutas cantonales para mejorar la seguridad vial con mayor énfasis en los distritos de San Isidro del General y Daniel Flores.

- **Elementos para demarcar según contratación:** Este proceso gestiona múltiples elementos de demarcación vial pero para fines comparativos se considera las líneas longitudinales y los altos, al ser estas las figuras de mayor demanda en la demarcación vial horizontal.
 - Plástico en frío, línea continua blanca: 13940 m
 - Plástico en frío, línea continua amarilla: 8750 m
 - Termoplástico, línea continua blanca: 26440 m
 - Termoplástica línea continua amarilla: 13270 m
 - Plástico en frío, altos: 31 unidades
 - Termoplástico, altos: 11 unidades

(Unidad Técnica de Gestión Vial, Municipalidad de Perez Zeledón, 2024)

Dentro de este proceso de contratación pública (**2024LE-000013-0004611901**), se recibieron tres ofertas por parte de empresas proveedoras del servicio de demarcación vial.

A continuación, se detallan las características principales de cada oferta, incluyendo el tipo de pintura ofertada y el monto unitario por metro lineal propuesto para la ejecución del servicio:

Tabla 50 Precios y tipo de material ofertados para línea continua-contratación 2024LE-000013-0004611901

Oferente	Tipo de pintura	Color	Monto	Unidad de medida	Empresa que cotiza
Oferente 1	Plástico en frío	Blanco/a marillo	₡935	metro	Mecsa
Oferente 2	Plástico en frío		₡900		Bela Consultores S.A.
Oferente 3	Plástico en frío		₡1.150		Publivías
Oferente 2	Termoplástico		₡1.215		Bela Consultores S.A.
Oferente 3	Termoplástico		₡1.400		Publivías

Tabla 39 Precios y tipo de material ofertados para altos horizontales-contratación 2024LE-000013-0004611901

Oferente	Tipo de pintura	Tipo de línea	Monto	Unidad de medida	Empresa que cotiza
Oferente 1	Plástico en frío	Señal de Alto	₡57.440	Unidad	Mecsa
Oferente 2	Plástico en frío		₡80.000		Bela Consultores S.A.
Oferente 3	Plástico en frío		₡95.000		Publivías
Oferente 2	Termoplástico		₡85.000		Bela Consultores S.A.
Oferente 3	Termoplástico		₡95.000		Publivías

Contratación 3: demarcación vial con pintura base solvente

Debido a que los procesos en los cuales se ofertó pintura plástica en frío no se ofertó simultáneamente pintura base solvente, como si sucedió con la termoplástica. Se procedió a averiguar precios de la pintura base solvente igualmente en el Sistema Integrado de Compras Públicas.

Proceso de contratación **2024LD-000080-0022200208**

Resumen de información recopilada:

- **Objeto contractual:** Contratación para la Demarcación Vial Horizontal Municipalidad de Poás
- **Elementos para demarcar según contratación:** Este proceso gestiona múltiples elementos de demarcación vial pero para fines comparativos se considera las líneas longitudinales y los altos, al ser estas las figuras de mayor demanda en la demarcación vial horizontal.
 - Base solvente, línea continua blanca: 309 m base
 - Base solvente, línea continua amarilla: 360 m base

Dentro de este proceso de contratación pública (2024LD-000080-0022200208), se recibieron dos ofertas por parte de empresas proveedoras del servicio de demarcación vial.

A continuación, se detallan las características principales de cada oferta, incluyendo el monto unitario por metro lineal propuesto para la ejecución del servicio:

Tabla 51 Precios ofertados para línea continua-contratación 2024LD-000080-0022200208

Oferente	Tipo de pintura	Color	Monto	Unidad de medida	Empresa que cotiza
Oferente 1	Base solvente	Blanco/a marillo	₡850	metro	Publivías
Oferente 2	Base solvente		₡675		Bela Consultores S.A.

Tabla 39 Precios ofertados para altos horizontales-contratación 2024LD-000080-0022200208

Oferente	Tipo de pintura	Tipo de línea	Monto	Unidad de medida	Empresa que cotiza
Oferente 1	Base solvente	Señal de Alto	₡40.000	Unidad	Publivías
Oferente 2	Base solvente		₡39.050		Bela Consultores S.A.

Contratación 4: demarcación vial con pintura base solvente

Proceso de contratación **2024LE-000005-0023200001**

Resumen de información recopilada:

- **Objeto contractual:** Demarcación Vial según demanda
- **Elementos para demarcar según contratación:** Este proceso gestiona múltiples elementos de demarcación vial pero en el cartel no especifica a que se refiere con figuras por lo que únicamente se tomó en consideración las líneas continuas.
- **Cantidad:** esta contratación es por demanda y no especifica cantidades

A continuación, se detallan los montos unitarios por metro lineal presentados en este proceso.

Tabla 52 Precios ofertados para línea continua-contratación 2024LE-000005-0023200001

Oferente	Tipo de pintura	Color	Monto	Unidad de medida	Empresa que cotiza
Oferente 1	Base solvente	Blanco/amarillo	₡565	metro	Señales Ram Rod de Costa RICA
Oferente 2	Base solvente		₡825		Soluciones Integrales Meyci Sociedad Anonima
Oferente 3	Base solvente		₡725		Publivias

A partir de los datos recopilados, se realizó un cálculo comparativo entre las ofertas presentadas, considerando de forma independiente los precios ofertados para dos tipos de demarcación horizontal: líneas continuas y señales horizontales tipo "ALTO". Este enfoque permite valorar con mayor detalle las diferencias económicas según la tipología de la intervención vial.

A continuación, se presentan los resultados de dicha comparación.

Tabla 53 Comparativa de precios para líneas continuas

Línea continua color blanco o amarillo					
Plástico en Frío		Material Termoplástico		Base Solvente	
Monto por metro	Promedio	Monto por metro	Promedio	Monto por metro	Promedio
₡850	₡ 1.007	₡1.015	₡ 1322	₡565	₡728
₡900		₡1.215		₡675	
₡935		₡1.250		₡725	
₡1.150		₡1.350		₡825	
₡1.200		₡1.400		₡850	
		₡1.700			

La demarcación con material termoplástico es en promedio un 31,3% más costosa que el plástico en frío. La demarcación con pintura solvente es en promedio 27,7% más barata que con pintura plástico en frío.

Tabla 54 Comparativa de precios para altos horizontales

Alto horizontal					
Plástico en Frío		Material Termoplástico		Base Solvente	
Monto por unidad	Promedio	Monto por unidad	Promedio	Monto por unidad	Promedio
€57.440	€ 77.480	€85.000	€ 90.000	€40.000	€39.525
€80.000		€95.000		€39.050	
€95.000					

El costo promedio de la demarcación de un símbolo de "ALTO" horizontal utilizando material termoplástico es un 16,2 % superior al costo promedio de realizar la misma demarcación con pintura plástica en frío. Por otro lado, la demarcación con pintura base solvente resulta un 49 % más económica en comparación con la pintura plástica en frío.

4.10 Aspectos ambientales asociados al uso de pintura plástica en frío

A partir de la revisión de diversas fuentes en línea, se identificó que múltiples sitios web que abordan el impacto ambiental de las demarcaciones viales hacen referencia a una misma investigación académica. Se trata del estudio *Sustainability Assessment of Road Marking Systems*, desarrollado por Cruz, Klein y Steiner (2016), el cual evalúa los impactos ambientales generados por las demarcaciones viales a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la producción de las pinturas hasta su disposición final una vez han cumplido su vida útil en las carreteras.

A continuación se presenta los datos mas relevantes y que es necesario tener presentes de esa investigación.

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) fue basado en las normas DIN ISO 14040 y 14044, realizó una comparación objetiva de los siguientes sistemas de demarcación: pintura a base de solventes, pintura a base de agua, termoplástico extruido y termoplástico aplicado por aspersión, pintura plástica en frío extruido y pintura plástica en frío aplicado por aspersión.

De acuerdo con la norma ISO 14040, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), también conocido como balance ecológico, es una herramienta científica utilizada para evaluar los impactos ambientales de un producto a lo largo de todo su ciclo de vida, desde su generación hasta el final de su vida útil.

La selección de tipo de demarcación vial por lo general se basa en requisitos técnicos, condiciones climáticas, topográficas, densidad de tráfico de la zona donde demarcará y consideraciones económicas. Los aspectos ambientales por lo general no son considerados, debido a la falta de datos sobre el impacto ambiental de los principales sistemas de demarcación vial.

Entrando técnicamente a la investigación de Marisa Cruz, Alexander Klein y Viviana Steiner se presentan los siguientes puntos:

- El estudio se llevó a cabo de conformidad con las normas DIN ISO 14040 y 14044
- La investigación se realizó en Alemania
- El tránsito promedio diario de los tramos estudiados es de 10,000 a 15,000 vehículos y requiere renovación aproximadamente cada 10 años.
- Este estudio se evaluó el ciclo de vida de la demarcación durante un período de 10 años.

- En la investigación se definió 1100 procesos realizados en la cadena desde la producción hasta el desecho de residuos de la demarcación al final de su vida útil.
- Para el estudio se utilizó el método del Instituto de Ciencias Ambientales de la Universidad de Leiden, con los factores de caracterización actualizados en noviembre de 2009, este método evalúa 8 aspectos de contaminación:
 - Potencial de calentamiento global (GWP100) [kg CO₂-equiv.]
 - Potencial de acidificación (AP) [kg SO₂-equiv.]
 - Potencial de eutrofización (EP) [kg fósforo-equiv.]
 - Potencial de formación de ozono fotoquímico (POCP) [kg eteno-equiv.]
 - Potencial de toxicidad humana (HTP) [kg DCB-equiv.]
 - Potencial de ecotoxicidad terrestre (TETP) [kg DCB-equiv.]
 - Potencial de ecotoxicidad acuática en agua dulce (FAETP) [kg DCB-equiv.]
 - Demanda de energía primaria como criterio adicional

A continuación se describe cada uno de los aspectos de contaminación:

- Potencial de calentamiento global (GWP)

El potencial de calentamiento global (también conocido como potencial de calentamiento de efecto invernadero o huella de carbono, CF) describe la capacidad de los diferentes gases de efecto invernadero para atrapar el calor en la atmósfera y contribuir al cambio climático.

- Potencial de acidificación (AP)

El potencial de acidificación incluye contaminantes del aire que contienen ácidos, que acidifican el suelo y los cuerpos de agua; los contaminantes son transportados en las precipitaciones.

- Potencial de eutrofización (EP)

La eutrofización es la acumulación excesiva de nutrientes en suelos y cuerpos de agua (sobre fertilización).

- Potencial de creación de ozono fotoquímico (POCP)

El potencial de creación de ozono fotoquímico, también conocido como smog de verano, potencial de formación de ozono o formación de ozono troposférico, es el equivalente en peso de eteno (C₂H₄) del ozono troposférico formado por precursores como óxidos de nitrógeno reactivos, monóxido de carbono o hidrocarburos volátiles (COV), que son responsables del O₃ troposférico.

- Potencial de toxicidad humana (HTP)

La categoría de impacto del potencial de toxicidad humana considera los peligros para las personas debido a la emisión de sustancias tóxicas. Los factores de equivalencia para el potencial de toxicidad humana (HTP) se refieren al 1,4-diclorobenceno (DCB) en el compartimento de aire.

- Potencial de ecotoxicidad terrestre (TETP) y Potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce (FAETP)

La ecotoxicología es el estudio de los cambios nocivos en la estructura y función de los ecosistemas causados por sustancias introducidas antropogénicamente. Se estudian las interacciones de factores bióticos y abióticos. Fuente: (Rohm)

La investigación se ha desarrollado en dos escenarios:

Escenario 1: líneas de capas delgadas como son las líneas borde y centro de las carreteras. Escenario 2: demarcaciones de capas gruesas que son las extruidas y se logran únicamente con material termoplástico y pintura plástico en frío.

Escenario 1: Demarcaciones longitudinales de capas delgadas

Este tipo de demarcación (espesor delgado) permite renovarse mediante la aplicación de una nueva capa por pulverización una vez que expire su vida útil.

En el escenario 1, se comparan diversos tipos de demarcación, a continuación se presenta una tabla con las variables consideradas y comparativa.

Tabla 55 Variables consideradas en el escenario 1, comparativa de tipos de demarcación vial con espesor delgado.

Tipo de material	Plástico en frío en spray tipo II	Termoplástico en spray tipo II	Base agua tipo II	Base solvente Tipo II
Espesor de capa (mm)	0,6	1,2	0,6	0,6
Consumo de material drop-on, (kg/m ²)	0,6	0,6	0,6	0,45
Vida útil (años)	2	2	1	1
N.º de demarcaciones	4	5	10	10

Fuente: (Cruz, Klein, & Steiner, 2016)

Escenario 2: Demarcaciones con material aglomerado (demarcaciones estructuradas), incluyendo el repintado por pulverización

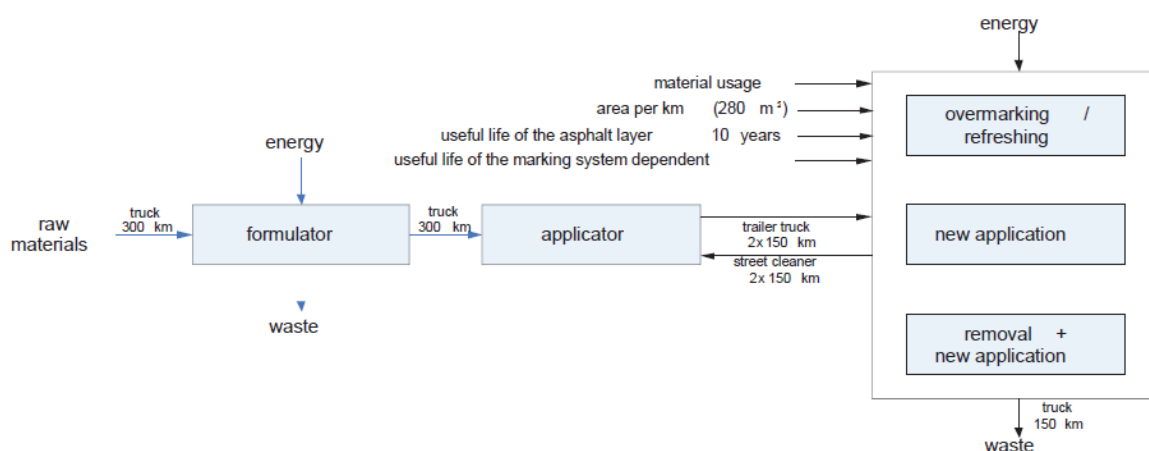
En el escenario 2 se comparan las demarcaciones de espesor grueso, también conocida como aglomerado, demarcación estructurada, extruido o “3D” que son aplicadas con pintura plástico en frío y material termoplástico. Para el plástico en frío, es posible dar mantenimiento con una capa delgada de este mismo material aplicado por pulverización (spray) de 0,3 mm. En este escenario se considera la opción de repintar y sin repintar para la pintura plástico en frío. En el caso del termoplástico, no se contempla la opción de mantenimientos mediante sobre capas de demarcación.

Tabla 56 Variables consideradas en el escenario 2, comparativa de tipos de demarcación con espesor grueso

Tipo de material	Plástico en frío (aglomerado, estructural)	Plástico en frío (aglomerado, estructural) + mantenimiento con plástico en frío en pulverizado	Termoplástico (aglomerado, estructural)
Solicitud	irregular 	irregular 	Regular 
Renovación o mantenimiento	Ninguno	Plástico pulverizado en frío (0,3mm)	Ninguno
Espesor de capa (mm)	No hay indicación	No hay indicación	No hay indicación
Consumo de material kg/m ²	2,8	0,47	3,7
Esfera aplicada kg/cm ²	0,4	0,3	0,37
Vida útil	4	4+ repeticionesx2	3
Numero de marcas	3	La primera demarcación extruida + máximo 3 repeticiones pulverizada (spray) = máximo 4 marcas	4

Supuestos del escenario de rutas de transporte

El transporte también forma parte del análisis ambiental y sus repercusiones, en la investigación se considera el transporte de las sustancias de demarcación desde la fabricación hasta el sitio de aplicación.



Resultados de la investigación de Marisa Cruz, Alexander Klein y Viviana Steiner

Los resultados de la investigación de Marisa Cruz, Alexander Klein y Viviana Steiner se presenta para cada uno de los escenarios analizados.

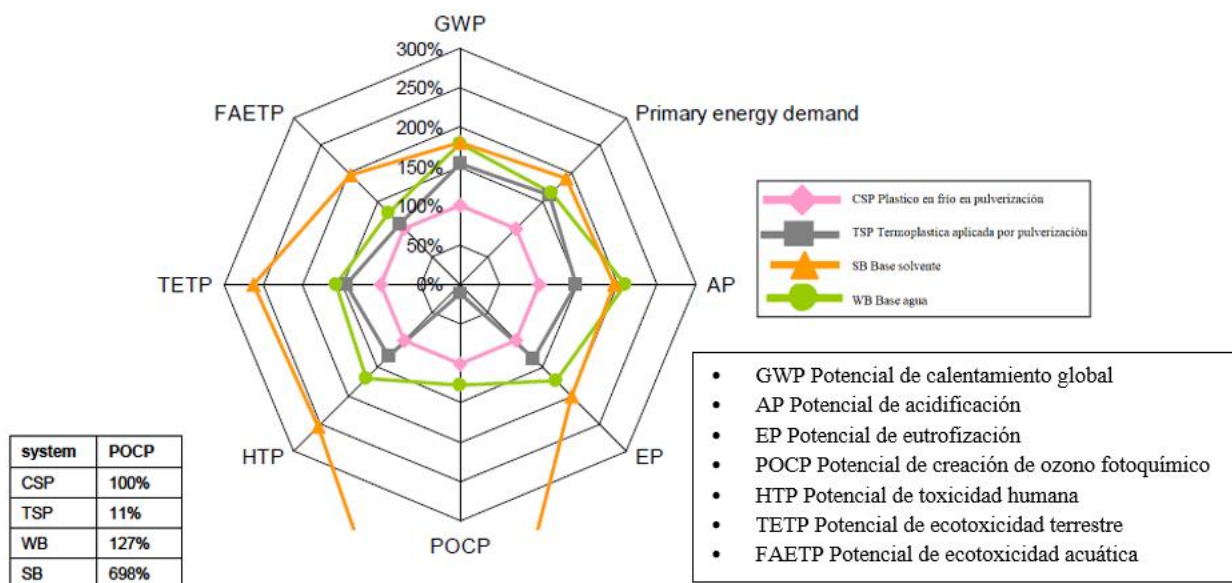
Escenario 1: demarcación en capa delgada tipo II aplicada por pulverización (spray). Este escenario mostro mejor impacto ambiental con el uso de plástico en frío aplicado por pulverización en 7 de los 8 indicadores considerados. El menor impacto obedece en gran medida a la mayor durabilidad del plástico en frío, en comparación con las pinturas base solvente y base agua. El plástico en frío, en general, debe su durabilidad inherente a sus características duroplásticas, este tipo de pintura al contener plásticos metacrílicos de metilo se curan químicamente mediante la adición de un endurecedor (segundo componente), formando así una demarcación de carretera altamente resistente de tipo duroplástico.

Se logra una reducción significativa del potencial de creación de ozono fotoquímico (POCP) mediante el uso de material termoplástico, seguido por plástico en frío aplicado en spray y pintura a base de agua. Esto se debe principalmente a las bajas emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) asociadas con estas tecnologías.

Por otro lado, los termoplásticos son materiales sólidos que deben fundirse a temperaturas de entre 200 °C y 220 °C (392 °F a 428 °F), lo que implica un elevado consumo energético, y por ende, un mayor consumo de energía primaria en comparación con la pintura plástico.

Las posibles contribuciones al POCP o impactos toxicológicos por evaporación o productos de descomposición volátiles originados durante el calentamiento del termoplástico han sido ignorados en este estudio (Sustainability assessment of road marking systems) debido a la falta de datos confiables.

Figura 61 Impactos ambientales relativos de las marcaciones de capa fina de plástico pulverizado en frío tipo II, pinturas termoplásticas pulverizables, pinturas a base de solventes y pinturas a base de agua.



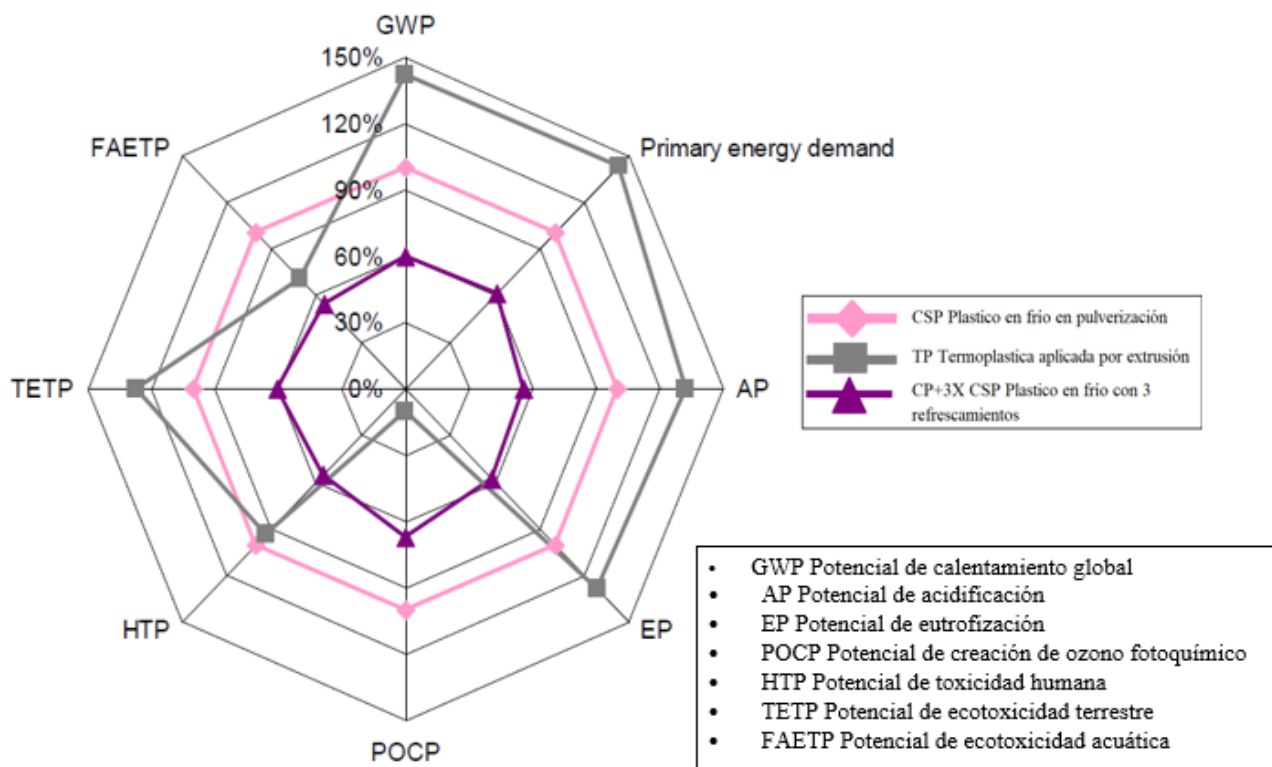
Escenario 2

Respecto al escenario 2 que consiste en demarcaciones con capas gruesas o aglomerados incluyendo el repintado, se resalta la durabilidad de la pintura plástico en frío ya que al ser repintados su vida útil se prolonga. Esta práctica común, restaura la retrorreflectividad Pérdida por el desgaste de los neumáticos con el tiempo, reduciendo así el impacto ambiental global de este tipo de demarcación.

La demarcación estructural con pintura plástico en frío y seguidamente la redemarcación como técnica de mantenimiento contribuye significativamente a la reducción del potencial de calentamiento global.

La investigación de Marisa Cruz, Alexander Klein y Viviana Steiner indica como ejemplo que en un país como Alemania, con 645000 km de carreteras pavimentadas, al aplicar pintura plástico en frío extruida o capa gruesa, se podría lograr una reducción anual potencial de 297000 toneladas de CO₂ equivalente, en comparación con los aglomerados termoplásticos. Esto equivale a las emisiones de gases de efecto invernadero de aproximadamente 63000 vehículos particulares por año (Greenhouse Gas Equivalencies Calculator)

Figura 62 Impactos ambientales relativos generados por demarcación estructural con pintura plástica en frío, plástico frío renovado tres veces con 0,3 mm de espesor de esa misma pintura y material termoplástico.



Los resultados obtenidos a partir del análisis de ciclo de vida, el cual abarca desde la etapa de fabricación hasta la disposición final del material, evidencian que la implementación de sistemas de demarcación vial con mayor durabilidad puede reducir el potencial de calentamiento global en más de un 50%. Esto demuestra que la selección adecuada de materiales y tecnologías para la demarcación, permite minimizar significativamente el impacto climático global.

En este contexto, los plásticos en frío a base de Metil Metracrilato, en su presentación tipo aglomerado se posicionan como una alternativa sostenible para la señalización vial. Su menor impacto ambiental se atribuye tanto a la resistencia inherente del material como a la posibilidad de extender su vida útil mediante la aplicación de una capa delgada de repintado. Además, el uso de plástico en frío resulta particularmente ventajoso frente a las pinturas base solvente, ya que reduce de forma considerable las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV), contribuyendo así a mitigar la generación de ozono fotoquímico a nivel del suelo. (Cruz, Klein, & Steiner, 2016)

Inspección durante demarcaciones respecto a contaminantes y cantidad de residuos:

En particular, la aplicación del material termoplástico conlleva un proceso operativo que exige un alto consumo energético y una importante generación de residuos gaseosos y calóricos. Este material debe ser calentado previamente en una cantera a temperaturas superiores a los 200 °C para alcanzar el estado viscoso que permite su aplicación. Este proceso térmico emite vapores visibles cargados de compuestos sólidos y partículas al ambiente, contribuyendo así a la contaminación atmosférica en la zona de trabajo. A esto se suma el uso de combustibles fósiles inflamables (como gas licuado de petróleo o diésel) necesarios para calentar tanto la cantera como las líneas de distribución del equipo de aplicación. Este conjunto de factores representa un incremento directo en la huella de carbono de las demarcaciones realizadas con este tipo de material.

Discusión de Resultados

En esta sección se analiza los resultados obtenidos a lo largo de la fase experimental del estudio, con el objetivo de evaluar el comportamiento técnico y operativo de la pintura plástico en frío comparándola con la pintura base solvente y el material termoplástico. El análisis se busca determinar la calidad de este nuevo producto en el mercado costarricense.

Los datos recopilados fueron procesados e interpretados a partir de parámetros cuantificables como retrorreflectividad, resistencia al deslizamiento, adherencia, durabilidad superficial y costos asociados, entre otros. Estos indicadores permiten establecer comparaciones objetivas entre los diferentes materiales, considerando tanto su rendimiento técnico como su relación costo-beneficio.

Asimismo, se identifican aspectos relacionados con la innovación y el desarrollo tecnológico en el campo de la demarcación vial, valorando el grado de adaptación de los productos a las condiciones del entorno vial costarricense y su potencial impacto en la seguridad del usuario. La interpretación de los resultados busca aportar conocimiento útil para la toma de decisiones en futuros proyectos de conservación y señalización vial.

El análisis de los datos se desarrolla inicialmente de forma individual para cada tipo de material de demarcación vial, con el fin de identificar su comportamiento particular frente a las variables evaluadas. Posteriormente, se unifica el análisis comparativo entre los tres materiales (pintura plástica en frío, pintura base solvente y material termoplástico) con el propósito de valorar la funcionalidad y el desempeño técnico de la pintura plástica en frío en relación con las demás alternativas empleadas en proyectos de señalización horizontal.

El análisis de resultados se ha planteado en relación directa con los objetivos y es por esto que se presenta por secciones:

1. Retrorreflectividad
2. Adherencia y desgaste de la demarcación vial horizontal
3. Resistencia al deslizamiento o fricción de la demarcación vial horizontal
4. Evaluación los precios de los tres tipos de material para demarcación vial
5. Análisis del impacto ambiental de cada material para demarcación vial

4.10.1 Retrorreflectividad

Fundamentado en el análisis estadístico mediante ANOVA, se determinó que los valores de retrorreflectividad obtenidos en las mediciones difieren significativamente entre los distintos tipos de materiales de demarcación vial. Esta condición se cumplió en la mayoría de las comparaciones realizadas, con excepción de dos casos específicos: la comparación entre pintura base solvente y termoplástico, y la comparación entre pintura base solvente y pintura plástica en frío, donde no se encontraron diferencias.

El comportamiento global del análisis ANOVA evidencia que la retrorreflectividad es, en general, diferente entre materiales. Sin embargo, en las dos excepciones mencionadas se obtuvo un resultado que indica igualdad entre las medias, lo cual es posible y atribuible a variaciones naturales en el desempeño de las demarcaciones. Estas fluctuaciones pueden estar asociadas a factores como una colocación inadecuada de las microesferas, variaciones en la formulación del producto, pérdida prematura de microesferas por desgaste o condiciones ambientales, entre otros.

Por ejemplo, en uno de los casos, el promedio de retrorreflectividad del termoplástico disminuyó a 290 cd/lx/m², acercándose al promedio de la pintura base solvente, que fue de 300 cd/lx/m². En otro caso, los valores promedio para la pintura base solvente y la pintura plástica en frío fueron 255 y 236 cd/lx/m², respectivamente, diferencias que resultaron no significativas.

De acuerdo con los principios del ANOVA, cuando el p-valor es inferior al nivel de significancia establecido ($\alpha = 0.05$), se rechaza la hipótesis nula (H_0), lo que indica que la retrorreflectividad entre los materiales analizados es significativamente diferente. Este resultado valida que, en la mayoría de los casos, cada tipo de pintura presenta un comportamiento retrorreflectivo propio, lo cual justifica la necesidad de realizar un análisis individual para cada uno, con el objetivo de identificar su desempeño específico a lo largo del tiempo.

Asimismo, es importante destacar que la retrorreflectividad es una propiedad altamente sensible a múltiples factores técnicos y de ejecución, tales como:

- El tamaño y la distribución de las microesferas de vidrio utilizadas como componente reflectante;
- La técnica de aplicación empleada en el proceso de demarcación;
- El espesor de la capa de pintura aplicada; y
- Las condiciones ambientales y operativas presentes durante la instalación.

Estos factores inciden directamente en la capacidad de reflexión luminosa nocturna que ofrecen las marcas viales, afectando tanto su desempeño funcional como su durabilidad. Por tanto, deben ser cuidadosamente considerados en los procesos de evaluación de calidad de los materiales demarcadores.

A continuación, se presenta el análisis detallado de los resultados de retrorreflectividad obtenidos para cada uno de los tres sistemas de demarcación estudiados.

Plástico en Frío

La pintura plástica en frío presentó un desempeño intermedio y para cada paño de prueba presenta resultados ligeramente diferentes ya que cada uno de los paños tiene cantidad de tránsito y deterioro

de la carpeta asfáltica diferente. A pesar de esta variabilidad, en términos generales, se observa una tendencia a mantener un nivel de reflectancia aceptable en la mayoría de los paños de prueba.

Respecto a la durabilidad o permanencia de la microesfera adherida a la membrana de pintura, los datos muestran un comportamiento destacado en líneas blancas. Tal como se observa en la Tabla 33, la pintura plástica en frío fue el tipo de demarcación que mejor conservó su capacidad reflectiva, con pérdidas del 5 % en el barrio San Francisco y 0 % tanto en el barrio Socorro como en María Auxiliadora. Este comportamiento sugiere una excelente adherencia de la microesfera al sustrato pintado, permitiendo una mayor permanencia del material reflectivo y, por ende, una mejor visibilidad nocturna a lo largo del tiempo.

En cuanto a las líneas amarillas, el comportamiento fue más heterogéneo, según lo evidenciado en la Tabla 34, con pérdidas que oscilan entre 0 % y 16 %. Sin embargo, aún dentro de este rango variable, es importante señalar que la pintura plástica en frío registró las menores pérdidas de retrorreflectividad en comparación con los otros materiales, lo que reafirma su superior adherencia de microesferas y mayor resistencia al desgaste de la retrorreflectividad en este color.

Desde el punto de vista normativo, los valores de retrorreflectividad medidos en este tipo de pintura presentan dificultades para ser evaluados con certeza debido a que Costa Rica no cuenta aún con una normativa nacional que establezca los valores mínimos aceptables, por tanto, en esta investigación se ha adaptado como referencia la regulación colombiana, la cual define valores mínimos según el tipo de ruta:

- Color blanco: mínimo de 140 mcd/lux/m²
- Color amarillo: mínimo de 120 mcd/lux/m²
- (para rutas terciarias, que es el caso de esta investigación)

Al analizar los resultados conforme a estos criterios, se observan los siguientes comportamientos:

- Color blanco: La retrorreflectividad se mantuvo consistentemente por encima del umbral de 140 mcd/lux/m² en todos los paños de prueba, lo cual indica cumplimiento normativo en todos los casos evaluados.
- Color amarillo: En el paño de prueba de barrio San Francisco, los valores fueron aceptables y por encima del mínimo normativo. En el caso de los paños de prueba en barrio Socorro, barrio María Auxiliadora y María Auxiliadora-Arriba-Abajo, aunque los valores estuvieron ligeramente por debajo de los 120 mcd/lux/m², se destaca que se mantuvieron estables a lo largo del tiempo y no sufrieron una disminución significativa, lo que sugiere una degradación controlada y progresiva.

A partir del análisis de los datos recolectados en los distintos paños de prueba, se identificaron situaciones que generan preocupación técnica, ya que los valores de retrorreflectividad medidos fueron inferiores a lo previsto en las hipótesis iniciales de esta investigación. Esta desviación entre lo esperado y lo observado en campo se atribuye al tipo de esfera aplicado a la demarcación, sin embargo es importante considerar otras variables como el tipo de superficie, la preparación previa, las condiciones climáticas, la técnica de aplicación y el tránsito vehicular.

En la Figura 38: *Resultados de medición de retrorreflectividad en el Cantón de Vázquez de Coronado (NO es un paño de prueba)*, se presentan los valores de retrorreflectividad obtenidos en este proyecto. Se destaca que la pintura plástica en frío logró alcanzar valores máximos de hasta 350 mcd/lux/m², con un promedio general en torno a los 260 mcd/lux/m². Estos resultados representan un desempeño

superior al observado en varios de los paños de prueba y evidencian que, la pintura plástica en frío es capaz de alcanzar niveles de retrorreflectividad altamente satisfactorios.

Tomando como referencia estos resultados, se observa que los valores obtenidos en el proyecto de Coronado no solo cumplen la norma colombiana, sino que superan ampliamente los umbrales exigidos para rutas terciarias, demostrando que la pintura plástico en frío, cuando es correctamente especificada y aplicada, puede igualar o incluso exceder los niveles de desempeño de materiales tradicionalmente considerados de mayor calidad, como el termoplástico.

Sin embargo, es fundamental advertir que, aunque en este proyecto se lograron valores equiparables a los exigidos para pintura termoplástica, no se debe asumir que ambos materiales deben evaluarse bajo los mismos criterios normativos, ya que poseen características físico-químicas distintas, ciclos de vida diferentes y aplicaciones específicas según el contexto vial. Por tanto, no corresponde aplicar de forma directa los estándares del material termoplástico a la pintura plástico en frío, especialmente en ausencia de una regulación nacional que contemple las particularidades de cada tecnología.

Los resultados obtenidos en el proyecto del cantón de Vázquez de Coronado aportan evidencia de que la pintura plástico en frío logra un alto desempeño retrorreflectivo cuando se aplican buenas prácticas constructivas.

Material Termoplástico

El análisis de los resultados obtenidos con la pintura termoplástica evidencia que este material presenta los valores más altos en la medición del retrorreflectivo entre los tres tipos de demarcación evaluados. Desde la primera medición, realizada entre los 10 y 15 días posteriores a la aplicación, se observaron valores altos de retrorreflectividad tanto en líneas blancas como en líneas amarillas. A lo largo del tiempo, en las mediciones intermedias (72 días) y finales (207 días), el material mantuvo un rendimiento superior, con niveles de reflectancia notoriamente más estables que los de los demás tipos de demarcación.

En términos de pérdida porcentual de retrorreflectividad, los resultados muestran que la pintura termoplástica conserva adecuadamente las microesferas reflectivas adheridas a su superficie, especialmente en líneas blancas. Como se observa en la Tabla 24, la pérdida registrada fue de apenas 7 % en el Barrio San Francisco y de 0 % en los barrios Socorro y María Auxiliadora, lo que indica una excelente estabilidad reflectiva en ese color.

En líneas amarillas (ver Tabla 34), presenta una mayor pérdida de retrorreflectividad en comparación con el color blanco. La reducción porcentual fue de 26 % en San Francisco, 49 % en Socorro, 39 % en María Auxiliadora, y 35 % en María Auxiliadora Arriba-Abajo. Estos porcentajes, si bien son elevados, deben interpretarse en conjunto con los valores absolutos, los cuales en la mayoría de los casos permanecieron por encima de los umbrales mínimos establecidos por la normativa costarricense INTECO Q46, que indica 250 mcd/lux/m². Por lo tanto, a pesar del desgaste progresivo, la pintura termoplástica sigue ofreciendo niveles adecuados de visibilidad nocturna al cabo de más de seis meses de exposición.

Este comportamiento se explica en gran parte por las propiedades físico-químicas del material. El material termoplástico se caracteriza por tener una alta resistencia al desgaste mecánico, mayor espesor aplicado y mejor encapsulamiento de la microesfera, lo que reduce la pérdida de capacidad reflectiva en condiciones de tránsito y clima agresivos. Además, su proceso de aplicación a alta

temperatura genera una unión más robusta entre la capa demarcadora y la superficie del pavimento, favoreciendo su durabilidad.

En cuanto a su desempeño normativo, los resultados muestran que los valores de retrorreflectividad en color blanco se mantuvo por encima del mínimo requerido según norma costarricense INTE Q46 300 mcd/lux/m².

Cabe señalar que, el material presentó pérdidas de retrorreflectividad en el color amarillo con el paso del tiempo y con una tendencia decreciente moderada, sin caídas abruptas, lo que refuerza la confiabilidad del material en escenarios urbanos de uso continuo.

Finalmente, el comportamiento general de la pintura termoplástica confirma su condición de material de alta gama en términos de desempeño retrorreflectivo

Pintura Solvente

Los datos muestran que la pintura solvente presentó las mayores pérdidas porcentuales de retrorreflectividad, especialmente en líneas de color amarillo. Como se detalla en la Tabla 34, las pérdidas fueron de 89 % en el Barrio San Francisco, 66 % en Socorro, 49 % en María Auxiliadora y 51 % en María Auxiliadora Arriba-Abajo. Este comportamiento evidencia una rápida degradación de las propiedades retrorreflectivas, lo cual compromete seriamente la visibilidad nocturna de la demarcación tras pocos meses de uso.

En cuanto a las líneas blancas, aunque el desempeño fue ligeramente mejor que en el color amarillo, los resultados continúan siendo desfavorables. La Tabla 33 muestra pérdidas de 31 % en San Francisco, 12 % en Socorro y 28 % en María Auxiliadora, lo que también representa un deterioro significativo considerando que las demarcaciones con este color tienden a requerir alta visibilidad para delimitar carriles y bordes de vía. Estos valores reflejan una capacidad limitada del material para retener las microesferas reflectivas adheridas a la superficie, debido tanto a su composición química como a su menor espesor en comparación con los otros tipos de demarcación,

Desde una perspectiva normativa, la demarcación con base solvente en algunos paños se localiza bajo nivel de retrorreflectividad, no cumpliendo los mínimos establecidos por la normativa costarricense adoptada en este estudio (250 mcd/lux/m² para color blanco y 200 mcd/lux/m² para color amarillo). En muchos casos, tanto los valores iniciales como los valores intermedios estuvieron por debajo de estos umbrales, lo que plantea cuestionamientos sobre la idoneidad de este tipo de pintura para demarcaciones permanentes o en vías con alto requerimiento de visibilidad nocturna.

Si se toma como puntos comparativos los valores de retrorreflectividad del material termoplástica de los paños de prueba y los valores de la pintura plástico en frío medido en Vásquez de Coronado se puede analizar que la pintura base solvente mostró una menor retrorreflectividad lo que podría explicarse por su baja viscosidad, bajo espesor de aplicación y menor capacidad de anclaje de la microesfera a la capa superficial.

Además, el análisis comparativo por sitio de estudio refuerza esta conclusión: independientemente de la ubicación geográfica y las condiciones específicas de cada tramo de prueba, la pintura solvente consistentemente ocupó el último lugar en desempeño retrorreflectivo, tanto en términos de valores absolutos como de estabilidad en el tiempo.

4.10.2 Adherencia y desgaste de las demarcaciones

En la Tabla 35 se presentan los resultados obtenidos en cuanto al porcentaje de adherencia de los tres tipos de materiales analizados.

El comportamiento observado en términos de adherencia y desgaste fue relativamente similar entre el material termoplástico y la pintura plástico en frío, ambos con niveles aceptables de fijación al sustrato. En contraste, la pintura base solvente mostró un grado de desprendimiento considerablemente más alto, lo cual representa una desventaja significativa en cuanto a su durabilidad y resistencia a las condiciones ambientales y de tránsito.

Para una evaluación más precisa, el análisis se ha segmentado por tipo de material, y se detalla a continuación.

Base solvente

En la tabla 35, se indica que la pintura base solvente presentó el mayor desprendimiento entre todos los tipos de pintura evaluados, tanto en las líneas de color amarillo como en las de color blanco. Este comportamiento fue especialmente notorio en el paño de prueba de Barrio San Francisco, donde se registró un desprendimiento del 25% en la primera medición y 75% en la segunda medición. Este valor resulta particularmente alto y, hasta el momento, no ha sido posible identificar una causa concreta que lo justifique. Cabe señalar que durante las labores de control de calidad se verificaron tanto los espesores de aplicación como las propiedades fisicoquímicas de las pinturas utilizadas, asegurando su conformidad con los estándares de calidad requeridos. Adicionalmente, durante las visitas de campo no se identificaron factores externos que pudieran explicar esta pérdida de adherencia, como derrames de hidrocarburos, tránsito de maquinaria pesada, o actos vandálicos.

Así mismo, en todos los paños de prueba presenta desprendimiento superior a los de la demarcación con los otros materiales. En el caso de barrio El Socorro alcanzó un 15% de desprendimiento, en el paño de prueba de Barrio María Auxiliadora un 25%, otro valor alto de desprendimiento se presentó en María Auxiliadora Arriba con un 35%. No se tienen certeza de este comportamiento ya que durante las visitas la ruta estaba libre y no se observaban químicos en la carretera que pudiera desprender la pintura.

Plástico en frío

Se ha observado que la pintura plástica en frío ha presentado un comportamiento muy bueno en términos de adherencia y durabilidad. En la mayoría de los paños de prueba, esta pintura mantiene en la segunda medición una cobertura del 100%, lo cual evidencia su alto desempeño en condiciones de exposición real.

En el caso puntual de Barrio María Auxiliadora si se visualiza un desprendimiento de un 5% en la primera medición y un 15% en la segunda medición. Se recalca que este paño de prueba fue seleccionado por que la carpeta asfáltica presenta un deterioro considerable(ver apartado 3.2.3): hay cuero de lagarto, Pérdida de finos y alta porosidad.. Estas condiciones incrementan el desgaste del material de demarcación, al ofrecer una base poco uniforme y de baja cohesión superficial.

En este paño de prueba (María Auxiliadora) la pintura plástico en frío ha demostrado una excelente capacidad de adaptación a las irregularidades de la calzada. Como se evidencia en las Imágenes 110 y 111, este tipo de pintura logra moldearse a baches, sobrecapas laterales y otras deformaciones sin perder su continuidad, gracias a su consistencia líquida durante la aplicación. Esta propiedad permite una mayor compacidad y elimina la presencia de vacíos entre la membrana de pintura y la superficie de rodadura. Por el contrario, el material termoplástico, debido a su mayor densidad y menor fluidez, no logra introducirse eficientemente en los poros o fisuras del pavimento, lo que puede generar espacios vacíos (ver imagen 115) y, en consecuencia, una menor capacidad de soporte en la membrana adherida.

También se ha observado que la pintura plástico en frío en superficies con cuero de lagarto se adhiere a las irregularidades de la carpeta (ver imagen 111) y no funciona como una membrana de unión entre los bloques de asfalto como si lo hace la demarcación con termoplástico (ver imagen 113 y 114).

Termoplástico

En cuanto al comportamiento del material termoplástico respecto al desprendimiento, se constató una adherencia del 100% durante la primera y segunda medición, lo cual indica un desempeño notablemente eficiente. Esta alta adherencia evidencia la buena capacidad del material para fijarse al sustrato y lo posiciona como una opción adecuada en términos de fijación sobre superficies debidamente preparadas.

Sin embargo, al estudiar el comportamiento en el paño de prueba de María Auxiliadora se observó una mayor tendencia a la fracturarse, esta condición se atribuye a la presencia de irregularidades y deformaciones en la superficie de rodadura.

En las figuras 113 y 114 se pueden observar fisuras en la membrana del material termoplástico, originadas por el cuero de lagarto de la calzada. Estas fisuras permiten el ingreso de humedad debajo de la demarcación, lo cual inicia un proceso de pérdida progresiva de adherencia. Este fenómeno consecuentemente provocará la pulverización del material fracturado, que facilita su desprendimiento y reduce la vida útil de la demarcación. A diferencia la pintura plástica en frío al ser mas delgada y menos viscosa logra introducirse en las grietas del cuero de lagarto y no agrietarse (figura 111)

Adicionalmente, como se evidencia en la figura 114, el material termoplástico tiende a deslizarse fuera del trazo demarcado cuando la superficie presenta ondulaciones o desniveles. Esta falta de estabilidad en la aplicación puede provocar acumulaciones irregulares de material, afectando tanto la estética como la funcionalidad de la señalización. En contraste, la pintura plástica en frío muestra un mejor desempeño en este aspecto, ya que logra mantener un trazo continuo y uniforme incluso sobre calzadas deformadas, como se muestra en la Figura 110. Esta condición no solo favorece una mejor legibilidad de la demarcación, sino que también evita el desperdicio de material, ya que no se producen empozamientos o acumulaciones innecesarias en las depresiones del pavimento.

4.10.3 Resistencia al deslizamiento en demarcaciones viales horizontales

Tal como se observa en el Gráfico 39, el valor del coeficiente de fricción, expresado como número de fricción BPN, correspondiente a la pintura plástico en frío fue de 29, de la base solvente es de 28 y del material termoplástico de 27. Estas diferencias son mínimas, lo cual fue demostrado por el análisis de varianza, en términos de resistencia al deslizamiento, los tres materiales evaluados presentan un comportamiento sin diferencias significativas.

Es importante destacar que la pintura plástico en frío, no evidencia un desempeño superior respecto a las opciones tradicionales en esta variable específica. No obstante, su rendimiento tampoco resulta inferior, lo cual puede considerarse como un aspecto favorable. Sin embargo, al comparar los valores obtenidos con referencias internacionales, se evidencian deficiencias significativas. Según el documento The NZ Roadmarkers Federation Inc., elaborado por Alister Harlow, se recomienda que las demarcaciones viales alcancen un mínimo de 45 BPN cuando el espesor de la película seca es inferior a 0,9 mm (como en el caso de las pinturas convencionales), y un rango entre 50 y 65 BPN para materiales con espesores iguales o superiores a 0,9 mm (como los materiales termoplásticos o de alta durabilidad). En este contexto, los valores registrados en todos los paños de prueba resultan considerablemente inferiores a los umbrales recomendados.

Cabe señalar que, en el caso de Costa Rica, no existe una normativa técnica vigente que establezca valores mínimos aceptables del coeficiente de fricción para las demarcaciones horizontales. En consecuencia, no es posible calificar estos resultados como no conformes desde un punto de vista normativo. Sin embargo, la diferencia sustancial respecto a los estándares internacionales genera una alerta importante, pues pone en evidencia una posible debilidad en la seguridad funcional de las demarcaciones evaluadas, especialmente bajo condiciones de humedad o frenado repentino.

En síntesis, si bien los tres materiales presentan un comportamiento similar en términos relativos, el bajo nivel absoluto del coeficiente de fricción registrado en campo debe considerarse una señal de advertencia que amerita mayor atención técnica y normativa en el país.

4.10.4 Aspectos ambientales en los que la pintura plástico en frío podría inferir en el medio ambiente.

La investigación de Marisa Cruz, Alexander Klein, Viviana Steiner permitió identificar que los materiales empleados en la demarcación vial, (pintura base solvente, base agua, material termoplástico y la pintura plástico en frío), presentan niveles diferenciados de afectación sobre el medio ambiente, de acuerdo con sus características físico-químicas, los procesos de fabricación, aplicación y disposición final.

El impacto ambiental de las demarcaciones es diferente entre el Escenario 1 y 2 propuesto en esa investigación, a continuación se presenta el análisis por cada escenario:

Escenario 1

Potencial de calentamiento global (GWP): la pintura **plástico en frío aplicado por pulverización (CSP)** es la mejor alternativa en términos de emisiones de gases de efecto invernadero durante todo su ciclo de vida.

Potencial de acidificación (AP): La pintura plástico en frío y el material termoplástico tienen bajos requerimientos energéticos, mientras que **la pintura base agua y base solvente y WB** requieren más energía, especialmente la base solvente.

Potencial de eutrofización (EP): La pintura plástico en frío presentan menor potencial de eutrofización

Potencial de formación de ozono fotoquímico (POCP): El material termoplástico destaca con solo el 11% del impacto relativo frente al 100% de referencia de la pintura plástico en frío.

El plástico termoplástico genera menos compuestos orgánicos volátiles (COV), lo que minimiza el smog troposférico.

Toxicidad humana (HTP): La pintura plástico en frío presenta el mejor impacto en toxicidad humana.

Potencial de Acidificación: La pintura base agua y solvente son los más perjudiciales, mientras que la pintura plástico en frío muestra el impacto más bajo.

Esto sugiere que los solventes presentes en esos materiales contribuyen significativamente a la acidificación del entorno (lluvia ácida, etc.).

Ecotoxicidad acuática en agua dulce y Ecotoxicidad Terrestre: En ambos casos la toxicidad ocasionada por las demarcaciones base solvente y aguas con las más altas a diferencia de la pintura plástico en frío que nuevamente es la inferior.

Escenario 2

El material termoplástico extruido presenta un impacto ambiental significativo en los indicadores de potencial de calentamiento global, acidificación, eutrofización y ecotoxicidad terrestre. No obstante, se destaca por ser la alternativa con menor contribución al potencial de formación de ozono fotoquímico (POCP).

En contraste, el sistema de pintura plástico en frío con redemarcaciones periódicas se posiciona como la opción más ambientalmente favorable entre los materiales analizados, al presentar los niveles más bajos de impacto en la mayoría de los indicadores evaluados, con excepción del POCP, donde su contribución es superior debido a la emisión de compuestos volátiles en el proceso de aplicación.

Estos resultados evidencian que, aunque ningún material es ambientalmente neutro, la pintura plástica en frío representa una alternativa favorable en la mayoría de las categorías de impacto analizadas.

Respecto a la inspección visual realizada durante la demarcación se ha verificado que el material termoplástico requiere la combustión para lograr la aplicación de este material, generando contaminación al medio por el calor residual y la emisión de contaminantes al aire tanto al inicio en la cantera como durante la aplicación del material.

En contraste, tanto la pintura base solvente como la pintura plástico en frío se encuentran listas para su uso en estado líquido, lo cual elimina la necesidad de procesos térmicos intensivos y, por ende, disminuye la generación de calor y gases contaminantes durante su aplicación. Aunque los equipos requieren una fuente energética (generalmente basada en combustibles fósiles) su consumo es notablemente inferior al requerido por los equipos de aplicación termoplástica.

Desde un enfoque de laboratorio y sostenibilidad ambiental, el análisis de la denominada “Huella Verde de Demarcaciones Viales”, tal como se menciona en la sección 3 del presente documento, indica que existen diferencias importantes en el impacto ambiental entre los distintos materiales, influenciadas por factores como la vida útil, el espesor mínimo requerido por aplicación y la frecuencia de mantenimiento.

De acuerdo con datos proporcionados por la empresa Biocomponentes del Centro S. de R.L., la pintura plástico en frío emite menos Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) que las pinturas base solvente.

En el desarrollo del análisis ambiental de los sistemas de demarcación vial, se identificó una limitante importante en cuanto a la disponibilidad de información proveniente de fuentes confiables y actualizadas. La principal referencia utilizada fue el estudio "Sustainability Assessment of Road Marking Systems" realizado por Marisa Cruz, Alexander Klein y Viviana Steiner, el cual constituye una base sólida, pero también evidencia la necesidad urgente de ampliar el conocimiento técnico mediante investigaciones experimentales y ensayos específicos en contextos locales o regionales.

Esta carencia de datos representa una oportunidad para fomentar estudios que profundicen en los impactos ambientales asociados al ciclo de vida de los materiales de demarcación, especialmente en un momento histórico en el que las consecuencias del deterioro ambiental se manifiestan de forma cada vez más severa a través de desastres naturales y crisis climáticas. En este contexto, el sector de la infraestructura vial tiene la responsabilidad de adoptar tecnologías y prácticas que minimicen la emisión de contaminantes, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático y la protección del equilibrio ecológico.

4.10.1 Análisis de la viabilidad económica de la demarcación vial con pintura plástico en frío y comparativa de precios con pintura base solvente y material termoplástico

El análisis de los precios unitarios obtenidos a partir de diversas contrataciones públicas en Costa Rica permite establecer una comparación directa entre las alternativas más utilizadas en la demarcación vial horizontal: pintura base solvente, pintura plástico en frío y material termoplástico. A través de este análisis se busca determinar el comportamiento económico relativo entre los materiales

1. Comparación de precios para demarcación lineal (línea continua)

En el caso de las líneas continuas, una de las tipologías de demarcación más frecuentes y demandadas en la red vial nacional, los precios por metro lineal varían significativamente según el tipo de pintura utilizada.

Tabla 57 Comparación de precios para demarcación lineal (línea continua)

Tipo de pintura	Rango de precios (€/m)	Promedio (€)	Observaciones
Base solvente	€565 – €850	€728	La opción más económica. Se observa estabilidad relativa en las ofertas más competitivas.
Plástico en frío	€850 – €1.200	€1,007	Alternativa de costo intermedio. Aún en etapa de consolidación en el mercado.
Termoplástica	€1.015 – €1.700	€1.322	La más costosa. Justificada solo si se valora su durabilidad a largo plazo.

Como se aprecia en los datos, la pintura plástico en frío tiene un precio promedio 27,7% superior al de la pintura base solvente y 31.3% inferior al material termoplástico. Esta posición intermedia puede considerarse estratégica en contextos donde se busque mejorar la durabilidad respecto al solvente, sin incurrir en los altos costos iniciales del termoplástico.

Además, se observa que la base solvente mantiene una oferta de precios más competitiva y estable, lo cual es esperado al tratarse de una tecnología ampliamente conocida, de aplicación sencilla y con logística menos exigente. En cambio, la pintura plástico en frío y el material termoplástico presentan

una mayor dispersión de precios, debido a diferencias en las metodologías de aplicación, tecnología disponible por parte de las empresas oferentes y nivel de especialización del personal técnico.

2. Comparación de precios para demarcación de símbolos horizontales tipo “ALTO”

En cuanto a la demarcación de señales horizontales tipo “ALTO”, también se registran variaciones significativas en los precios unitarios, expresados por unidad.

Tabla 58 Promedio y rangos de precios para cada tipo de demarcación.

Tipo de pintura	Rango de precios (₡/unidad)	Promedio (₡)	Observaciones
Base solvente	₡39.050 – ₡40.000	₡39.525	La opción más accesible. Costo muy uniforme entre oferentes.
Plástico en frío	₡57.440 – ₡95.000	₡77.480	Alternativa intermedia. Amplia dispersión de precios.
Termoplástica	₡85.000 – ₡95.000	₡90.000	Mayor costo. Dirigido a demarcaciones de larga duración.

En las demarcaciones de altos horizontales, la pintura plástico en frío vuelve a ocupar el segundo puesto respecto a precios. Como se indicó en la sección de resultados la demarcación de esta figura con material termoplástico es 16% más costosa en comparación con la pintura plástico en frío. Por otro lado, la pintura base solvente más económica que la pintura plástico en frío por un 49% del monto de esta última.

La pintura base solvente nuevamente resulta ser la más económica con un costo promedio 49% más bajo que el de la pintura plástico en frío y hasta 56% más barato que el termoplástico. En este caso, además, se observa una notable dispersión en los precios ofertados con plástico en frío.

La diferencia observada en los costos de demarcación entre los distintos tipos de pintura es un resultado previsible, considerando las particularidades técnicas y operativas asociadas a cada sistema de aplicación. Durante la ejecución en campo, se evidenció que cada técnica implica diferentes niveles de complejidad, requerimientos de personal especializado, consumo de materiales, riesgos operativos y condiciones de seguridad.

En el caso específico de la demarcación con material termoplástico, esta requiere el uso de fuentes de calor para fundir el material antes de su aplicación, así como el empleo de equipos altamente especializados. Entre estos se incluyen la *cantera* para el calentamiento, carritos aplicadores con compartimientos térmicos que mantienen el material a una temperatura constante y una fuente de calor activa, generalmente un cilindro de gas. La manipulación de estos equipos debe estar a cargo de personal capacitado con conocimientos técnicos específicos, ya que cualquier error en el manejo puede comprometer la calidad de la demarcación y un riesgo operativo, todos estos aspectos se traducen en costos económicos.

Por otro lado, las pinturas base solvente y plástico en frío no requieren de calentamiento previo, lo cual elimina los costos asociados al uso de energía térmica y reduce significativamente los riesgos durante la operación. No obstante, es importante destacar que, aunque su aplicación es menos compleja que la del termoplástico, el equipo de aplicación del plástico en frío es más delicado y requiere de personal mas especializado que para la demarcación con pintura solvente, significado este punto gastos mas altos en mano de obra para la pintura plástico en frío

En contraste, el equipo utilizado para aplicar pintura base solvente, si bien requiere también conocimiento técnico para su uso, es más tolerante a fallas mecánicas y menos susceptible a daños operativos. Esta simplicidad en la operación se traduce en menores costos logísticos y de mantenimiento, lo que en parte justifica su posición como la alternativa más económica.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Entre las principales conclusiones de la investigación se puntualizan los siguientes:

La pintura plástica en frío demostró estabilidad en la retrorreflectividad a lo largo del tiempo, En los paños de prueba su desempeño fue inferior al termoplástico, pero comparable al de la pintura solvente. Cumple con los mínimos exigidos por la normativa colombiana, siendo técnicamente adecuada para vías urbanas y terciarias. Se evidenció que la pintura plástico en frío logra alcanzar valores superiores a 300 mcd/lux/m² en la primera medición realizada entre los primeros 15 días posteriores a la demarcación.

La pintura plástica en frío presentó **menor desgaste y desprendimiento** en comparación con la pintura base solvente, y un comportamiento **similar al termoplástico** en cuanto a resistencia mecánica. Además, evidenció **mayor capacidad de adaptación a superficies irregulares y deterioradas**, manteniendo su integridad sin agrietarse, a diferencia del material termoplástico, que tiende a fracturarse ante deformaciones del pavimento.

Los tres materiales mostraron valores sin diferencias significativas respecto a la resistencia al deslizamiento (fricción). Todos registraron coeficientes BPN inferiores a los recomendados internacionalmente, evidenciando una posible debilidad funcional bajo condiciones húmedas o de frenado, lo que destaca la importancia de mejorar la resistencia al deslizamiento de las demarcaciones.

Desde una perspectiva técnico-económica, la pintura plástico en frío se sitúa entre la pintura base solvente y el material termoplástico. Aunque su costo por metro es mayor que el solvente, ofrece mayor durabilidad y menor frecuencia de repintado. A diferencia del termoplástico, no requiere calentamiento ni maquinaria especializada, reduciendo costos logísticos y energéticos, lo que favorece su viabilidad económica en proyectos que buscan optimizar costo-beneficio y vida útil.

El análisis ambiental indica que la pintura plástico en frío es una alternativa con menor impacto acumulado. Su aplicación en frío reduce consumo energético y emisiones contaminantes, a diferencia del termoplástico. Además, emite menos compuestos orgánicos volátiles que la pintura base solvente. Aunque faltan datos de fabricación, el análisis de ciclo de vida disponible sugiere un desempeño ambiental más equilibrado y favorable.

En conjunto, las conclusiones del presente estudio permiten afirmar que la pintura plástico en frío representa una solución técnicamente equilibrada y económicamente viable para la demarcación vial en Costa Rica. Su desempeño ha demostrado ser superior al de la pintura base solvente en términos de adherencia, retrorreflectividad y durabilidad, y aunque no iguala completamente al material termoplástico en ciertos parámetros, presenta ventajas significativas en cuanto a menor impacto ambiental, menores requerimientos energéticos y costos intermedios más accesibles. Esta tecnología, además, ofrece una mejor adaptabilidad a superficies irregulares y conserva sus propiedades funcionales con menor pérdida en el tiempo. Los resultados obtenidos respaldan su incorporación como una alternativa técnica sostenible y estratégica, donde se requiere un balance entre rendimiento, costo y facilidad de aplicación

5.2 Recomendaciones

Con base en los hallazgos obtenidos en la presente investigación, se formulan recomendaciones técnicas dirigidas a entidades públicas responsables de la planificación, diseño y conservación de la

infraestructura vial (en Costa Rica: MOPT, CONAVI, Municipalidades, LanammeUCR, etc); empresas privadas vinculadas a proyectos de señalización horizontal y centros académicos con programas en ingeniería civil y transporte. Estas recomendaciones tienen como finalidad promover una implementación más eficiente, técnicamente fundamentada y sostenible del sistema de pintura plástico en frío en obras de demarcación vial.

- Se recomienda a entidades encargadas de la gestión de la red vial extender el uso de esta tecnología en vías urbanas y primarias donde se requiera una solución con buena adherencia, resistencia al desgaste y con destacada durabilidad. Su capacidad de adaptarse a superficies fisuradas o deformadas la convierte en una opción técnicamente viable en pavimentos con condiciones irregulares.
- Se recomienda a empresas privadas que realizan trabajos de demarcación vial y organismos inspectores incorporar a las demarcaciones con pintura plástico en frío, microesferas de mayor índice de refracción (tipo III), con el fin de mejorar la visibilidad nocturna y mantener valores superiores a los mínimos normativos durante el tiempo de servicio.
- Adicionalmente, es fundamental que las autoridades competentes, como el MOPT, INTECO y el LanammeUCR, promuevan la elaboración de una normativa técnica nacional específica para pintura plástico en frío. Esta normativa debería contemplar parámetros físico-químicos, condiciones de aplicación, preparación de superficie, cantidad de microesferas, así como criterios de aceptación y mantenimiento preventivo.
- Se recomienda a entes de investigación privado y público que desde el punto de vista ambiental, fomenten las investigaciones complementarias sobre el ciclo de vida del la pintura plástico en frío, su generación de residuos, emisiones e impacto en la salud.
- A instituciones académicas y empresas proveedoras de pintura plástico en frío se sugiere continuar con estudios de campo a largo plazo, en distintas regiones climáticas del país, con el fin de consolidar evidencia técnica y validar su comportamiento en diversos entornos operativos, lo cual permitiría fortalecer su incorporación progresiva en los manuales y especificaciones técnicas vigentes en Costa Rica.

CAPÍTULO 6: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Akzonobel. (s. f.). Documento referencia para la especificación de pinturas plástico en frío a base de resinas metacrílicas reactivas.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). Sinalização horizontal viária — Plástico a frio à base de resinas metacrílicas reativas: Fornecimento e aplicação (Vol. 2). ABNT.

Biocomponentes del Centro S. de R.L. de C.V. (2021). Pintura para tráfico, plástico en frío MMA (pre). San Luis Potosí, México.

Biocomponentes del Centro S. de R.L. de C.V. (2021). Pintura plástico en frío PF modificada spray (PFMS). San Luis Potosí, México.

Boily, F., & Tremblay, M. (2014). Guide sur la rétroreflexion du marquage routier.

Cruz, M., Klein, A., & Steiner, V. (2016). Sustainability assessment of road marking systems. 6th Transport Research Arena, April 18–21, 2016.

Empresa Portuaria Valparaíso. (s. f.). Tipos de pintura en demarcación vial. <https://www.apv.cl/n/tipos-de-pintura-en-demarcacion-vial>

Federal Highway Administration. (2013). Pavement marking demonstration projects: State of Alaska and State of Tennessee (Publication No. FHWA-HRT-12-048). U.S. Department of Transportation.

Greenhouse Gas Equivalencies Calculator. (s. f.). U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/cleanenergy/energy-resources/calculator>

Guerrero, J. P. (2021). Evaluación de la compatibilidad entre materiales de demarcación vial horizontal para la redemarcación sobre marcas existentes en carreteras de Costa Rica [Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica].

Harlow, A. (2005). Materiales para la señalización del pavimento y resistencia al deslizamiento.

Hofmann. (s. f.). Demarcación vial perfilada. <https://www.hofmannla.com/2021/01/05/demarcacion-vial-perfilada>

Ingeniería Técnica de Proyectos ITP, S. (2024). CD-ITP-1094-2024-35-C01.

Instituto Nacional de Vías. (2008). Manual de diseño geométrico para carreteras.

Instituto Nacional Meteorológico. (s. f.). Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica. <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Regionalizaci%C3%B3n+clim%C3%A1tica+de+Costa+Rica>

INTEC. (2011). Pintura para demarcación de pavimentos: Especificaciones. Colombia.

INTECO. (2016). Pintura termoplástica para señalización vial. Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica.

INTECO. (2021). INTE Q46:2021. Pinturas y barnices: Guía de buenas prácticas para la demarcación vial horizontal (4.^a ed.). Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica.

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales/PITRA. (2014). Informe técnico [Archivo PDF]. Universidad de Costa Rica. <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/338/58.pdf>

LanammeUCR, PITRA. (2014). Desempeño de la demarcación vial horizontal en Costa Rica a través del parámetro de retrorreflexión. Universidad de Costa Rica.

LanammeUCR, PITRA. (2017). Desempeño y durabilidad de la demarcación vial horizontal en Costa Rica. Universidad de Costa Rica.

Mendoza, J. V. (2022). Retroreflectividad de las microesferas en la señalización horizontal según el tipo de pavimentos en vías urbanas [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería]. Lima, Perú.

Ministerio de Obras Públicas y Transporte. (2024). Primer trimestre del 2024 muestra la menor cifra de muertos en carretera desde el 2012. <https://www.mopt.go.cr/noticias/2024/primer-trimestre-del-2024-muestra-la-menor-cifra-de-muertos-en-carretera-desde-el>

Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. (2001). Manual de señalización de tránsito: Demarcaciones. Gobierno de Chile.

Montgomery, D. C. (2020). Design and analysis of experiments (10th ed.). Wiley.

MOPT. (2024). Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes. Ministerio de Obras Públicas y Transporte.

Pintuco. (s. f.). Pintutráfico plástico en frío llana. <https://www.pintuco.com.ec/wp-content/uploads/2020/01/pintutrafico-plastico-en-frio-en-llana.pdf>

Rohm. (s. f.). The green choice of road marking systems.

Rojas Hidalgo, E. (2023). Grado de desempeño de la demarcación vial para cumplir niveles de servicio: Tramo Huancavelica - Lircay [Tesis de maestría, Universidad Nacional del Centro del Perú].

Rondero Arias, L. (2021). Viabilidad técnica de utilizar la pintura plástica en frío de 2 componentes para señalización horizontal en el departamento de Risaralda [Tesis de maestría, Universidad Tecnológica de Pereira].

Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM). (2020). Standard test method for evaluating degree of resistance of traffic paint to abrasion, erosion, or a combination of both, in road service tests (ASTM D913). ASTM International.

The NZ Roadmarkers Federation Inc., & Harlow, A. (s. f.). Skid resistance and pavement marking materials.

Thermapply. (2025, abril 4). Las marcas viales termoplásticas mejoran la seguridad. <https://thermapplydirect.com/blogs/road-marking-solutions/thermoplastic-road-markings-enhance-safety>

Triola, M. F. (2018). Estadística (13.^a ed.). Pearson Educación.

Unidad Técnica de Gestión Vial, Municipalidad de Pérez Zeledón. (2024). Pliego de condiciones: Contratación 2024LE-000013-0004611901. Municipalidad de Pérez Zeledón.

Voller Home. (2020, octubre 29). ¿Qué es y para qué sirve la pintura termoplástica? <https://vhome.com.mx/que-es-y-para-que-sirve-la-pintura-termoplastica>

Zamora Coto, M. V. (2016). Evaluación de la retrorreflexión y el desgaste de la demarcación vial horizontal: Estudio en carretera y con el simulador de vehículo pesado (HVS) [Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica].

Zona de Pinturas. (2013, octubre). Desarrollan pinturas de plástico en frío para demarcación vial. <https://www.zonadepinturas.com/201310012890/noticias/tecnologia/desarrollan-pinturas-de-plastico-en-frio-para-demarcacion-vial>

CAPÍTULO 7: APÉNDICES

7.1 APÉNDICE A: Porcentaje de área con demarcación adherida a la superficie

San Francisco

Líneas transversales

Plástico en frío

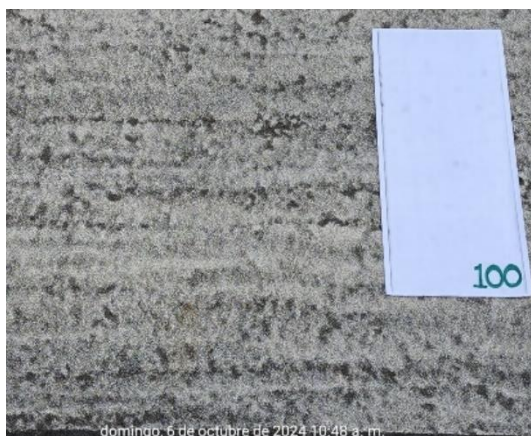


Figura 63 Desprendimiento de pintura plástico en frío, el día 6/10/2024



Figura 64 Desprendimiento de pintura plástico en frío, el día 15/03/2025

Pintura solvente



Figura 65 Desprendimiento de pintura solvente, el día 6/10/2024



Figura 66 Desprendimiento de pintura solvente, el día 15/03/2025

Termoplástico



Figura 67 Desprendimiento de material termoplástico, el día 6/10/2024



Figura 68 Desprendimiento de material termoplástico, el día 15/03/2025

Líneas longitudinales

Plástico en frío



Figura 69 Desprendimiento de plástico en frío, el día 6/10/2024

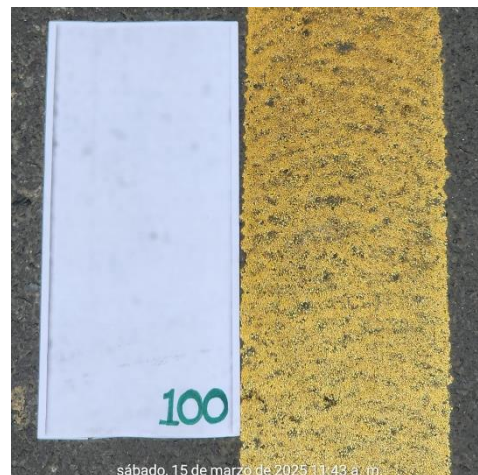


Figura 70 Desprendimiento de plástico en frío, el día 15/03/2025

Solvente

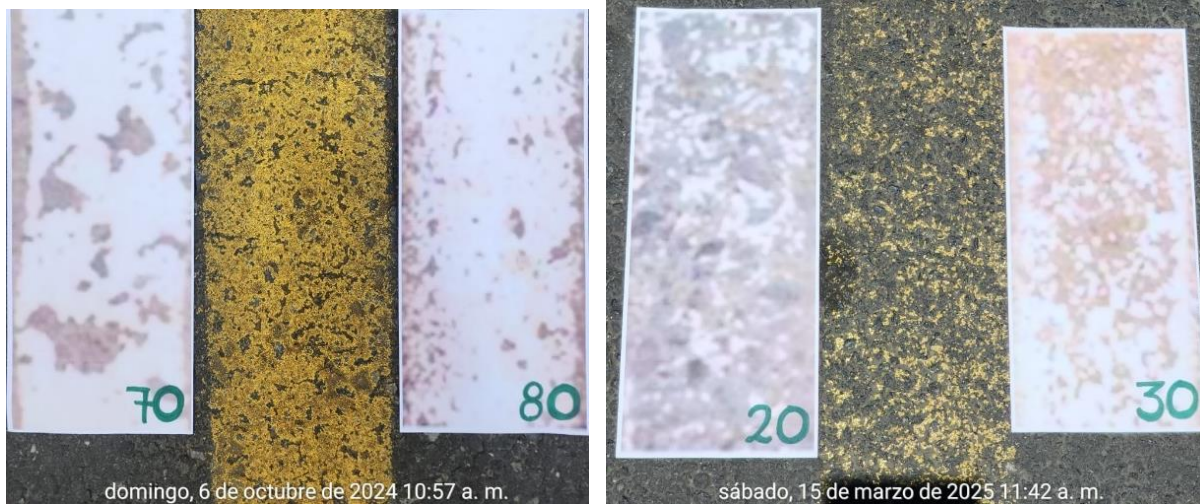


Figura 71 Desprendimiento de pintura solvente, el día 6/10/2024

Figura 72 Desprendimiento de pintura solvente, el día 15/03/2025

Termoplástico



Figura 73 Desprendimiento material termoplástico, el día 6/10/2024

Figura 74 Desprendimiento de material termoplástico, el día 15/03/2025

Líneas longitudinales blancas

Plástico en frío



Figura 75 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 6/10/2024



Figura 76 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 15/03/2025



Figura 77 Desprendimiento de pintura solvente, el día 6/10/2024



Figura 78 Desprendimiento de pintura solvente, el día 15/03/2025

Termoplástico



Figura 79 Desprendimiento material termoplástico, el día 6/10/2024

Figura 80 Desprendimiento de material termoplástico, el día 15/03/2025

Barrio Socorro

Líneas transversales



Figura 81 líneas transversales Barrio Socorro

Plástico en frío

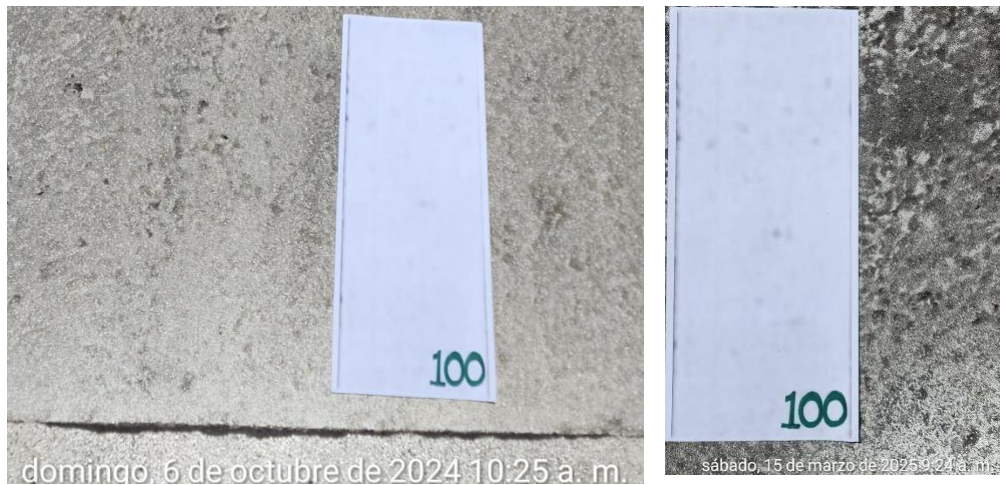


Figura 82 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 6/10/2024

Figura 83 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 15/03/2025

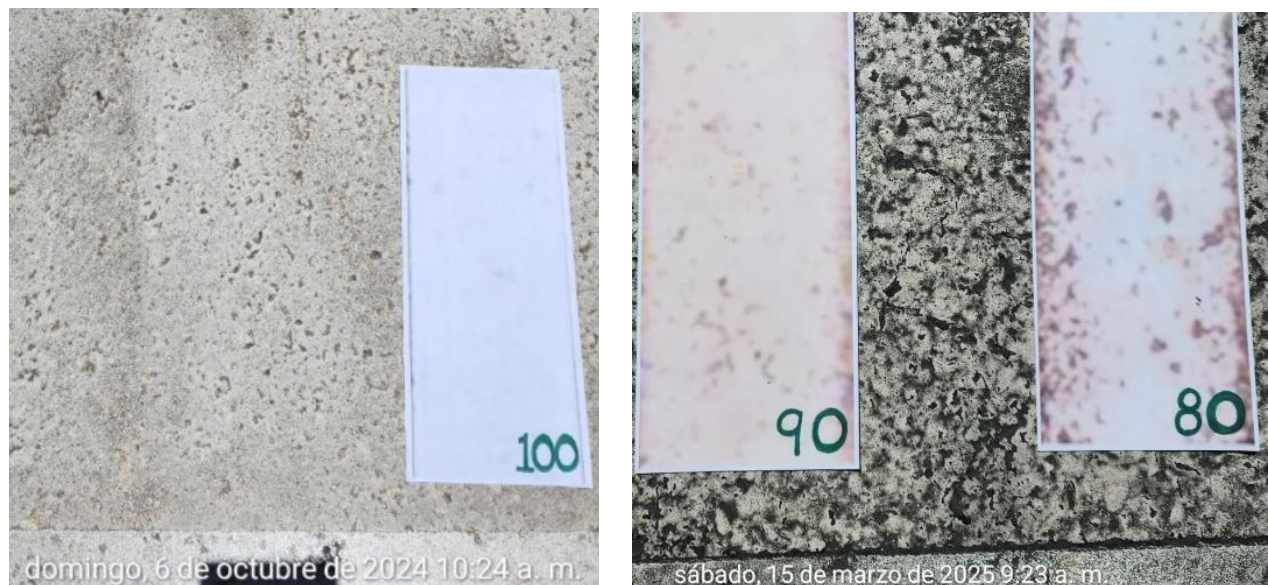


Figura 84 Desprendimiento de pintura solvente, el día 6/10/2024

Figura 85 Desprendimiento de pintura solvente, el día 15/03/2025



Figura 86 Desprendimiento material termoplástico, el día 6/10/2024

Figura 87 Desprendimiento de material termoplástico, el día 15/03/2025

Línea amarilla longitudinal

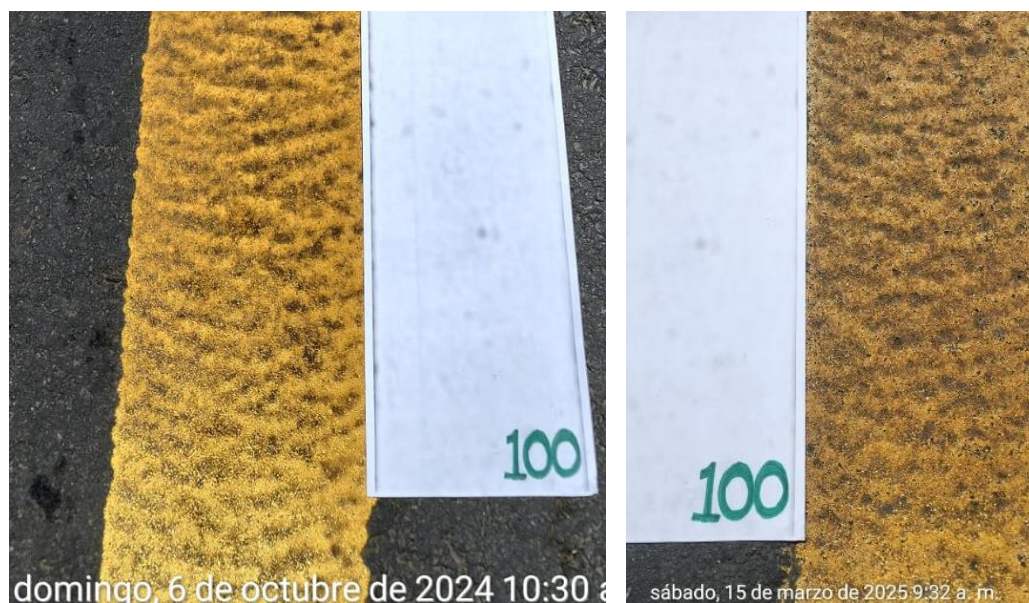


Figura 88 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 6/10/2024

Figura 89 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 15/03/2025

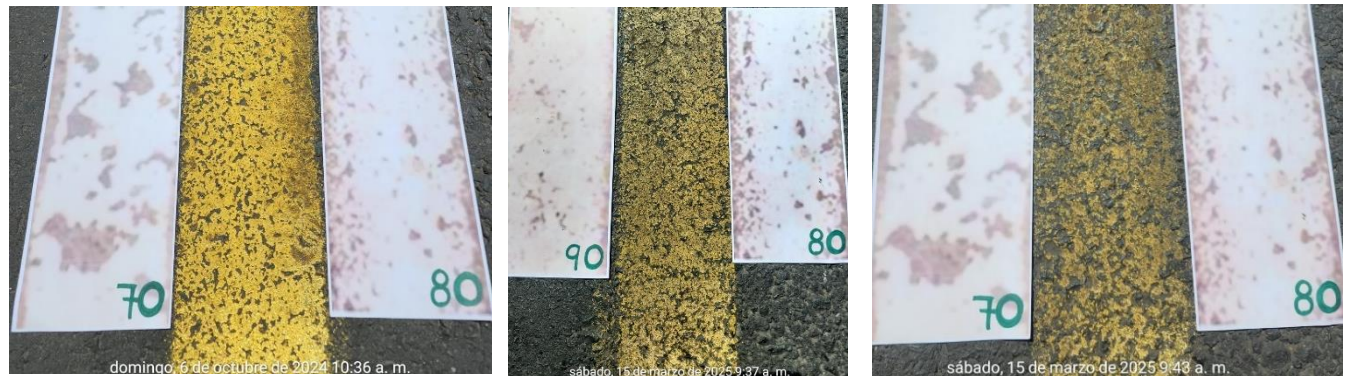


Figura 90 Desprendimiento de pintura solvente, el día 6/10/2024

Figura 91 Desprendimiento de pintura solvente, el día 15/03/2025

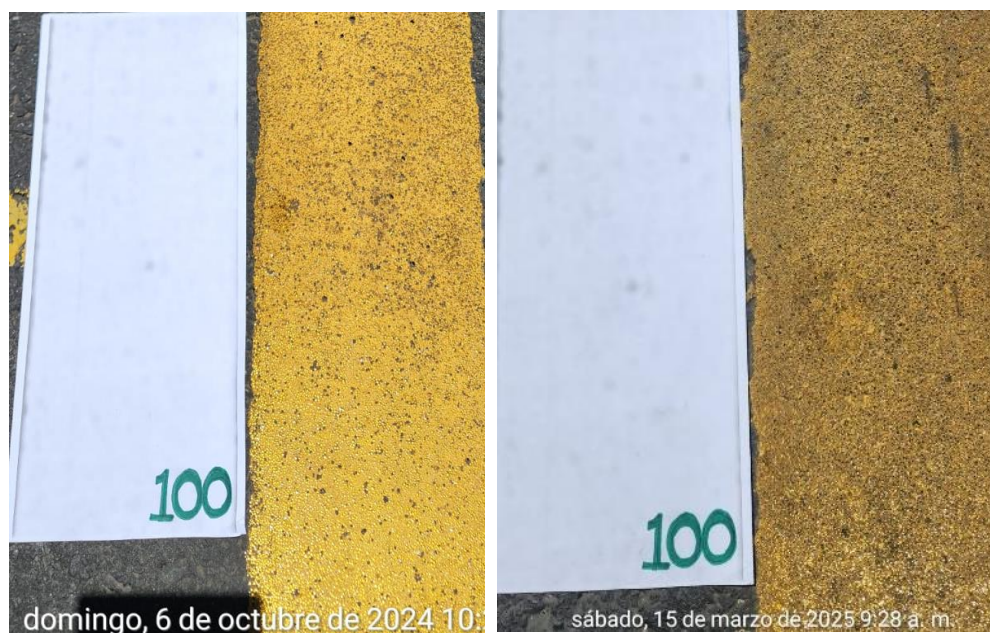


Figura 92 Desprendimiento material termoplástico, el día 6/10/2024

Figura 93 Desprendimiento de material termoplástico, el día 15/03/2025

Líneas blancas longitudinales

Plástico en frío



Figura 94 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 6/10/2024

Figura 95 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 15/03/2025

Solvente

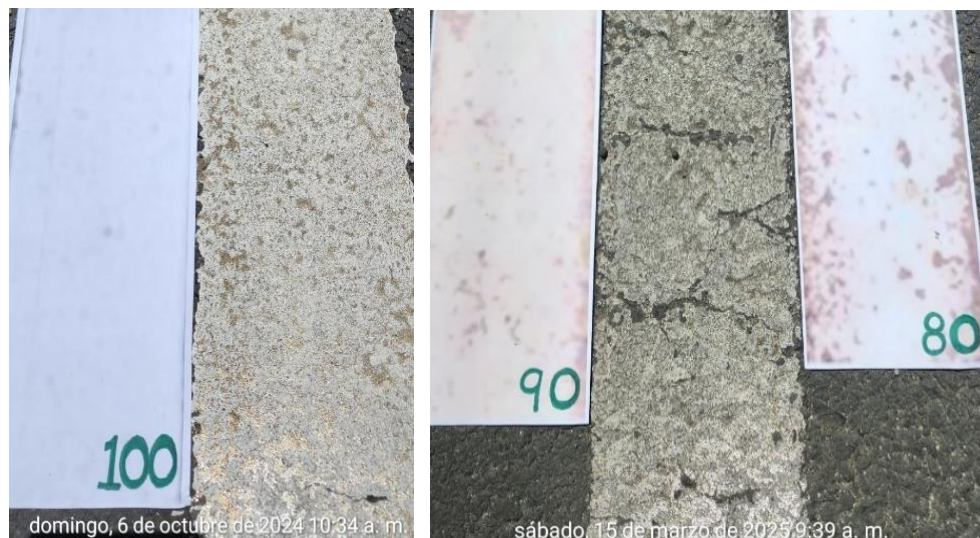


Figura 96 Desprendimiento de pintura solvente, el día 6/10/2024

Figura 97 Desprendimiento de pintura solvente, el día 15/03/2025

Termoplástico



Figura 98 Desprendimiento material termoplástico, el día 6/10/2024



Figura 99 Desprendimiento de material termoplástico, el día 15/03/2025

Barrio María Auxiliadora



Figura 100 Líneas transversales Barrio María Auxiliadora

Plástico en frío

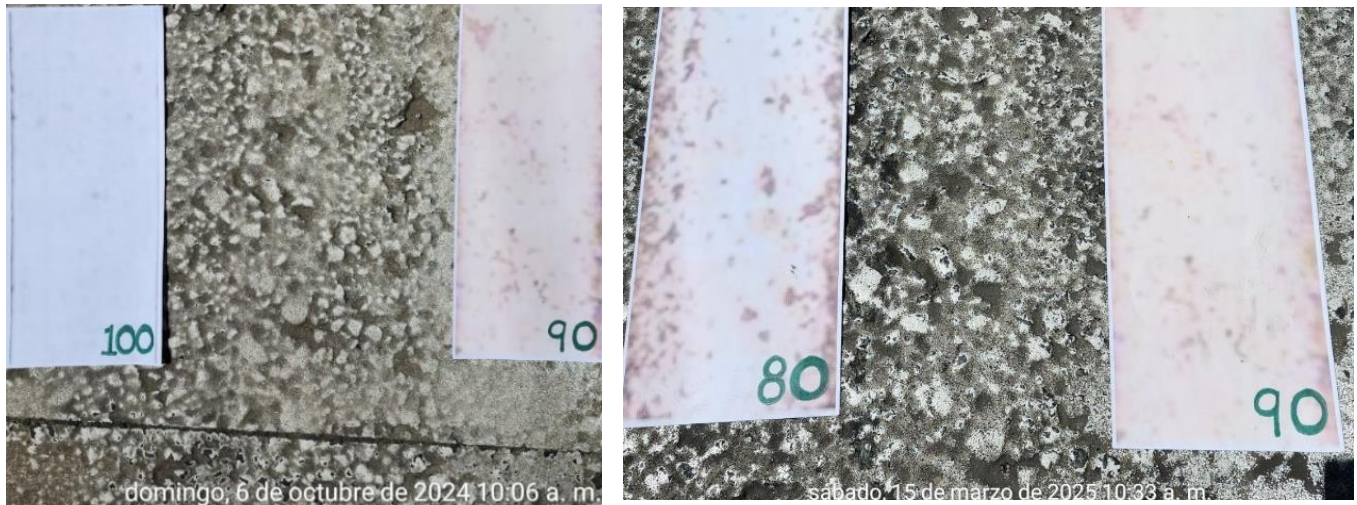


Figura 101 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 6/10/2024

Figura 102 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 15/03/2025

Solvente

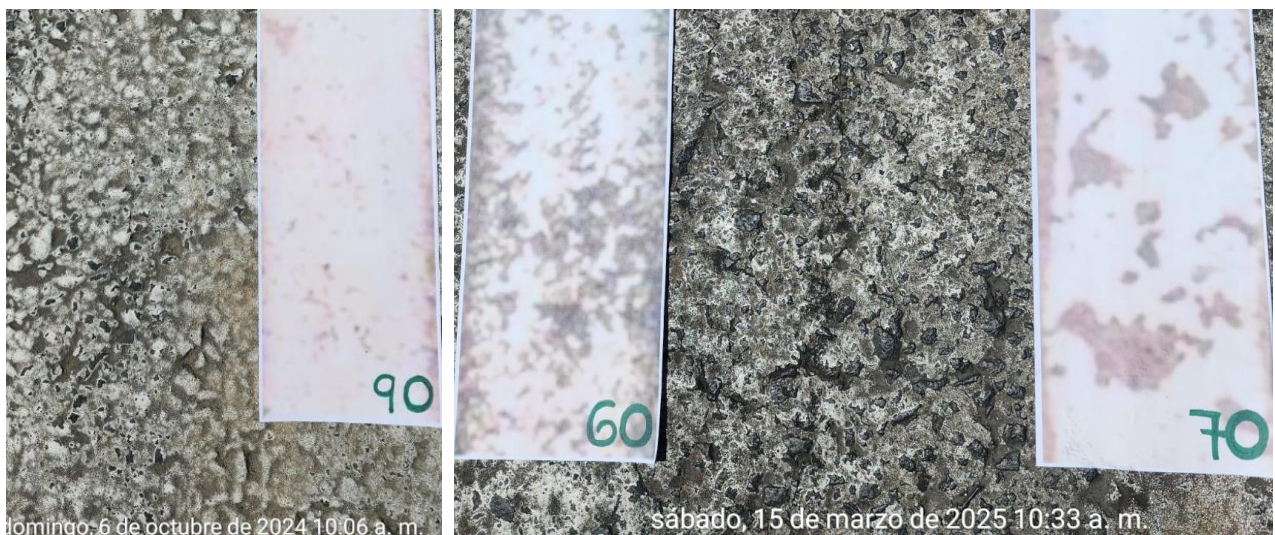


Figura 103 Desprendimiento de pintura solvente, el día 6/10/2024

Figura 104 Desprendimiento de pintura solvente, el día 15/03/2025

Termoplástico



Figura 105 Desprendimiento material termoplástico, el día 6/10/2024



Figura 106 Desprendimiento de material termoplástico, el día 15/03/2025

Líneas amarillas longitudinales

Plástico en frío



Figura 107 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 6/10/2024



Figura 108 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 15/03/2025

Solvente



Figura 109 Desprendimiento de pintura solvente, el día 6/10/2024

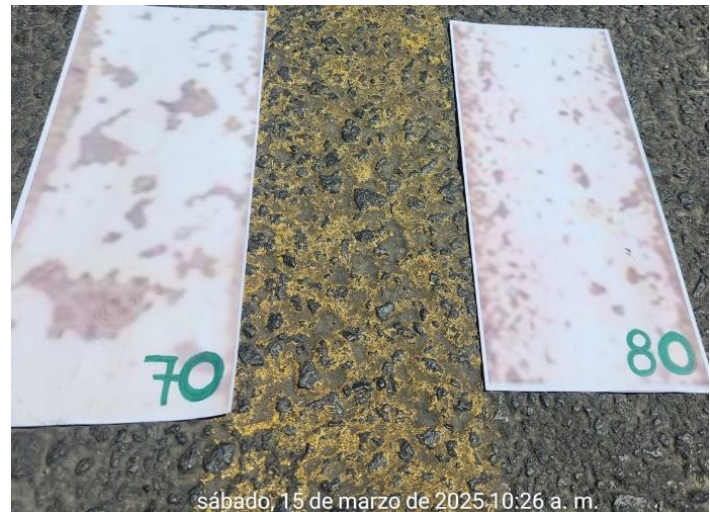


Figura 110 Desprendimiento de pintura solvente, el día 15/03/2025

Termoplástico



Figura 111 Desprendimiento material termoplástico, el día 6/10/2024



Figura 112 Desprendimiento de material termoplástico, el día 15/03/2025

Líneas blancas longitudinales

Plástico en frío



Figura 113 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 6/10/2024



Figura 114 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 15/03/2025

Solvente

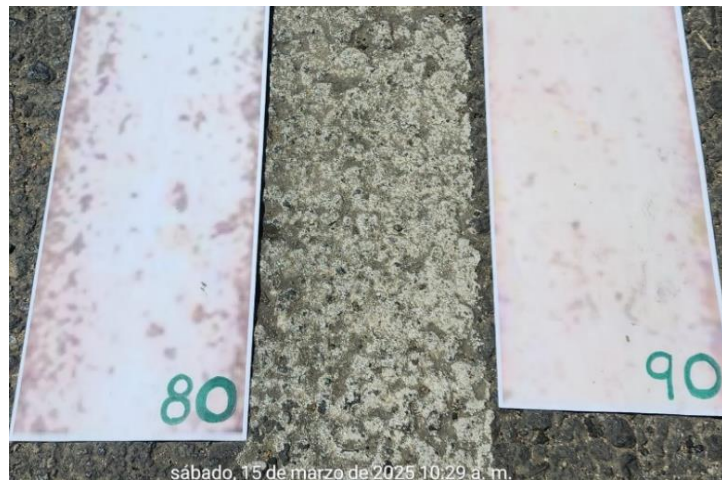
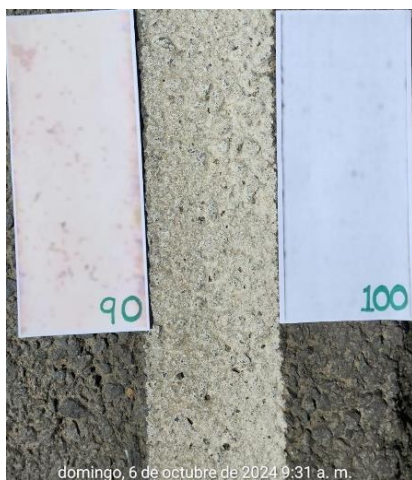


Figura 115 Desprendimiento de pintura solvente, el día 6/10/2024

Figura 116 Desprendimiento de pintura solvente, el día 15/03/2025

Termoplástico



Figura 117 Desprendimiento material termoplástico, el día 6/10/2024

Figura 118 Desprendimiento de material termoplástico, el día 15/03/2025

Barrio María Auxiliadora Arriba

Líneas amarillas longitudinales

Plástico en frío

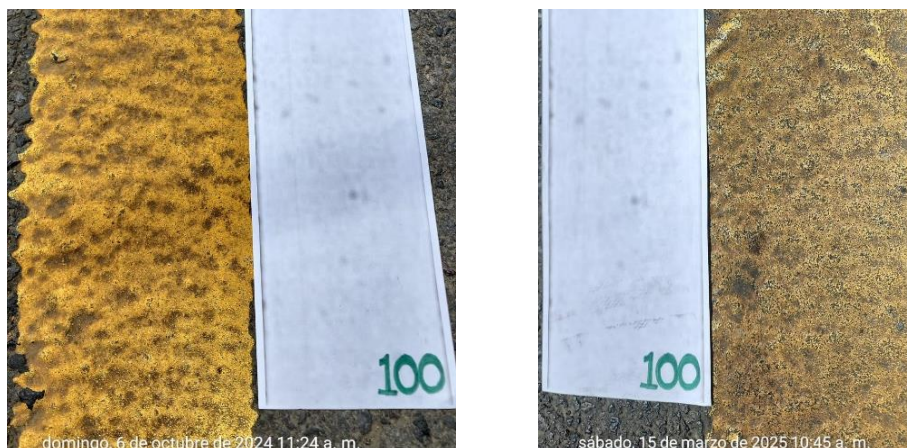


Figura 119 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 6/10/202

Figura 120 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 15/03/2025

Solvente

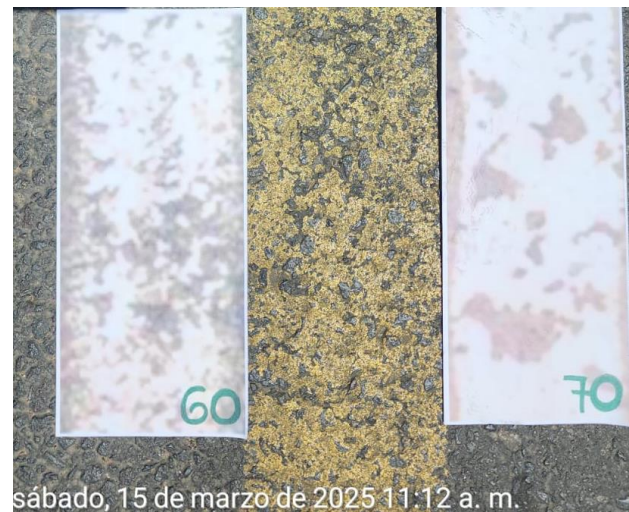


Figura 121 Desprendimiento de pintura solvente, el día 6/10/2024

Figura 122 Desprendimiento de pintura solvente, el día 15/03/2025

Termoplástico



Figura 123 Desprendimiento material termoplástico, el día 6/10/2024

Figura 124 Desprendimiento de material termoplástico, el día 15/03/2025

Auxiliadora Abajo

Plástico



Figura 125 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 6/10/2024

Figura 126 Desprendimiento pintura plástico en frío, el día 15/03/2025

Solvente

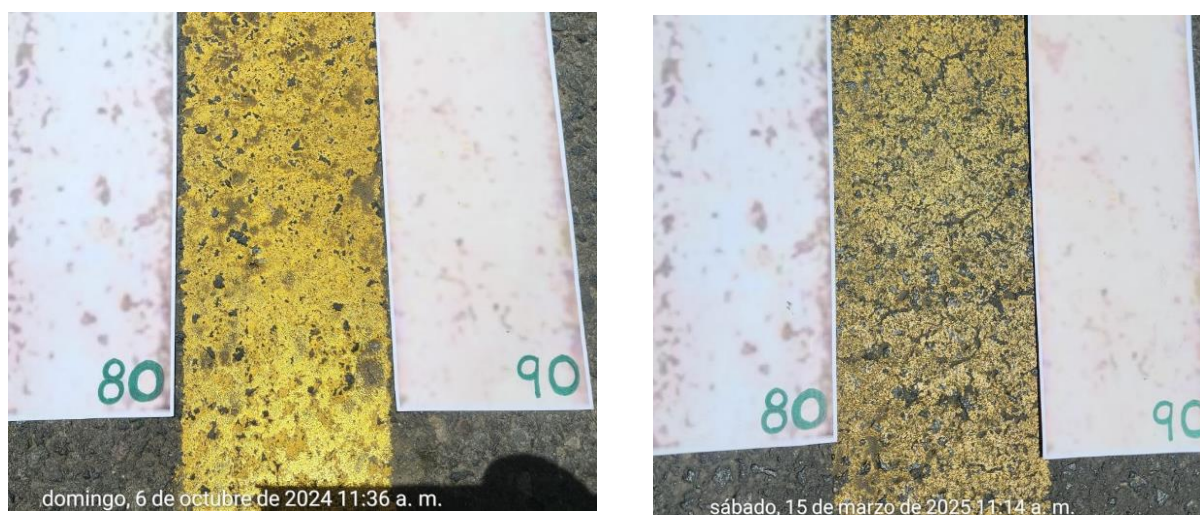


Figura 127 Desprendimiento de pintura solvente, el día 6/10/2024

Figura 128 Desprendimiento de pintura solvente, el día 15/03/2025

Termoplástico



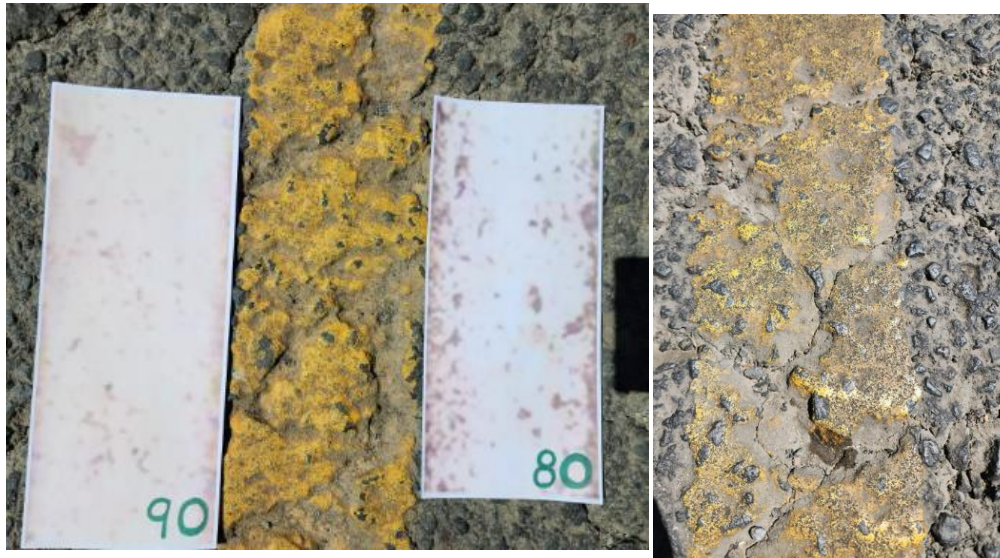
Figura 129 Desprendimiento material termoplástico, el día 6/10/2024

Figura 130 Desprendimiento de material termoplástico, el día 15/03/2025

7.2 APENDICE B: Evaluación visual de la demarcación vial



Figura 131 Pintura plástico en frío adaptada a la irregularidad de la calzada



X

Figura 132 Pintura plástico en frío adaptada a las fisuras de la calzada



Figura 133 Pintura base solvente adaptada a las fisuras de la calzada.



Figura 134 Material termoplástico fracturado en puntos donde hay fisuras en la calzada

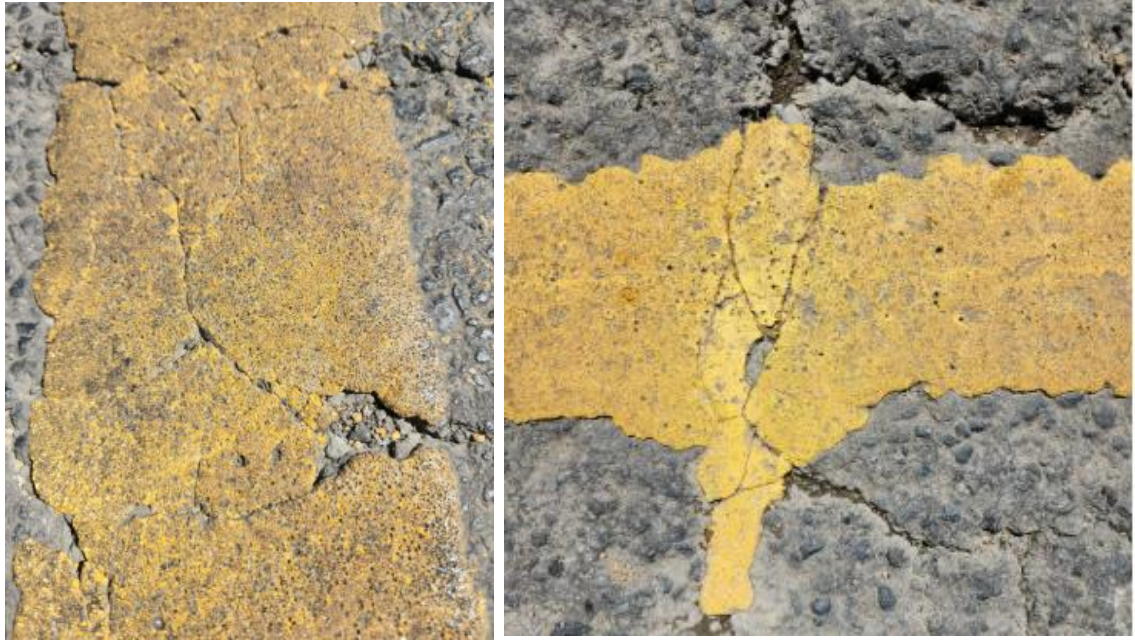


Figura 135 Material termoplástico desprendido en puntos donde hay fisuras en la calzada



Figura 136 Material termoplástico desprendido en puntos donde quedo vacío.

7.3 APENDICE C: Medición de la resistencia al deslizamiento con péndulo británico



Figura 137 Medición de la resistencia al deslizamiento con péndulo británico



Figura 138 Medición de la resistencia al deslizamiento con péndulo británico, Barrio El Socorro.
Plástico en Frio



Figura 139 Medición de la resistencia al deslizamiento con péndulo británico. Barrio El Socorro
Plástico en Frio



Figura 140 Medición de la resistencia al deslizamiento con péndulo británico. Barrio San Francisco
Plástico en Frio

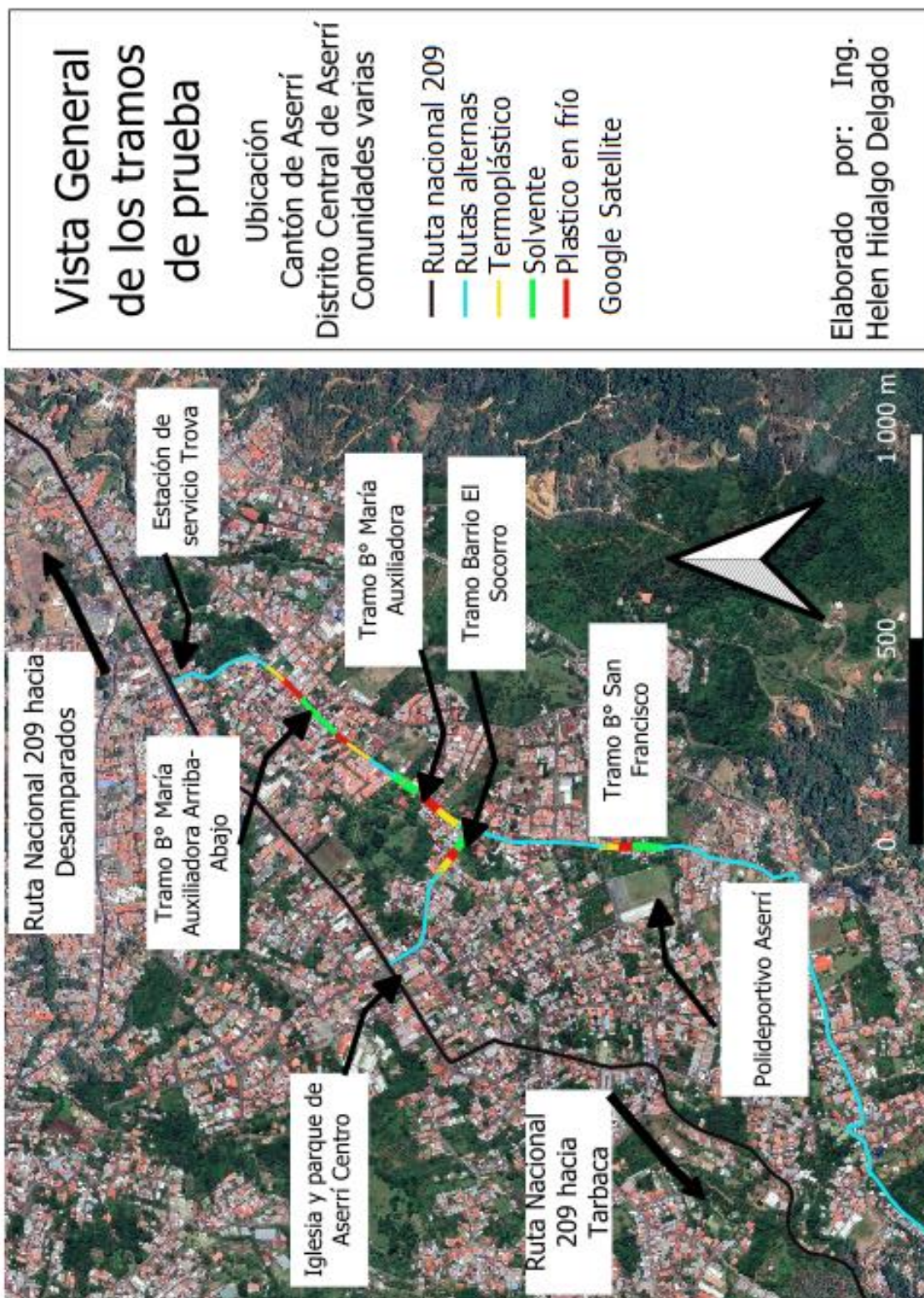


Figura 141 Medición de la resistencia al deslizamiento con péndulo británico .Barrio San Francisco
Material Termoplástico



Figura 142 Medición de la resistencia al deslizamiento con péndulo británico. Barrio María
Auxiliadora. Material Termoplástico

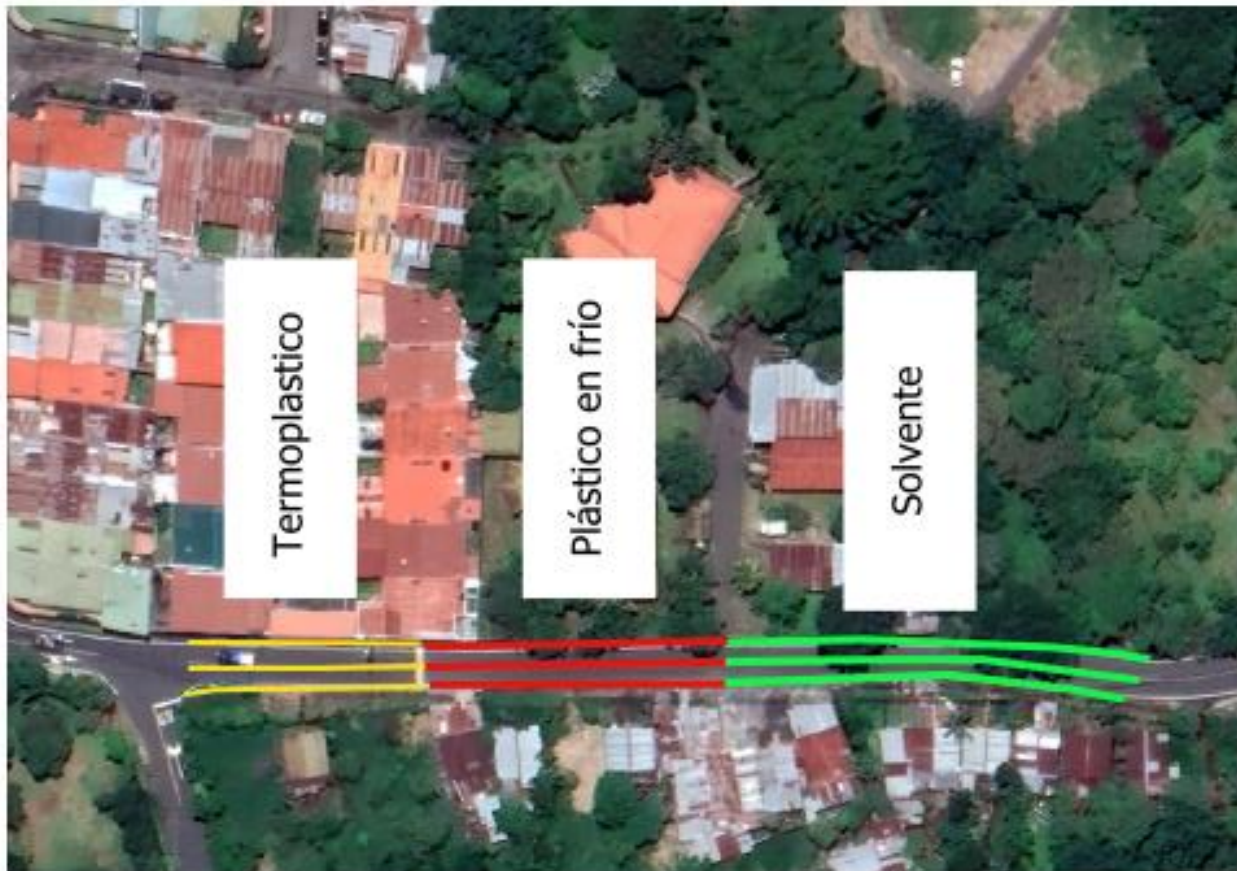
7.4 APENDICE D: Mapa de vista general de la ubicación de todos los tramos de prueba



7.5 APENDICE E: Paño de prueba A Barrio San Francisco

TRAMO DE
PRUEBA A
Barrio San
Francisco

Evaluación del
comportamiento
de la pintura
plástico en frío en
proyectos de
demarcación vial.



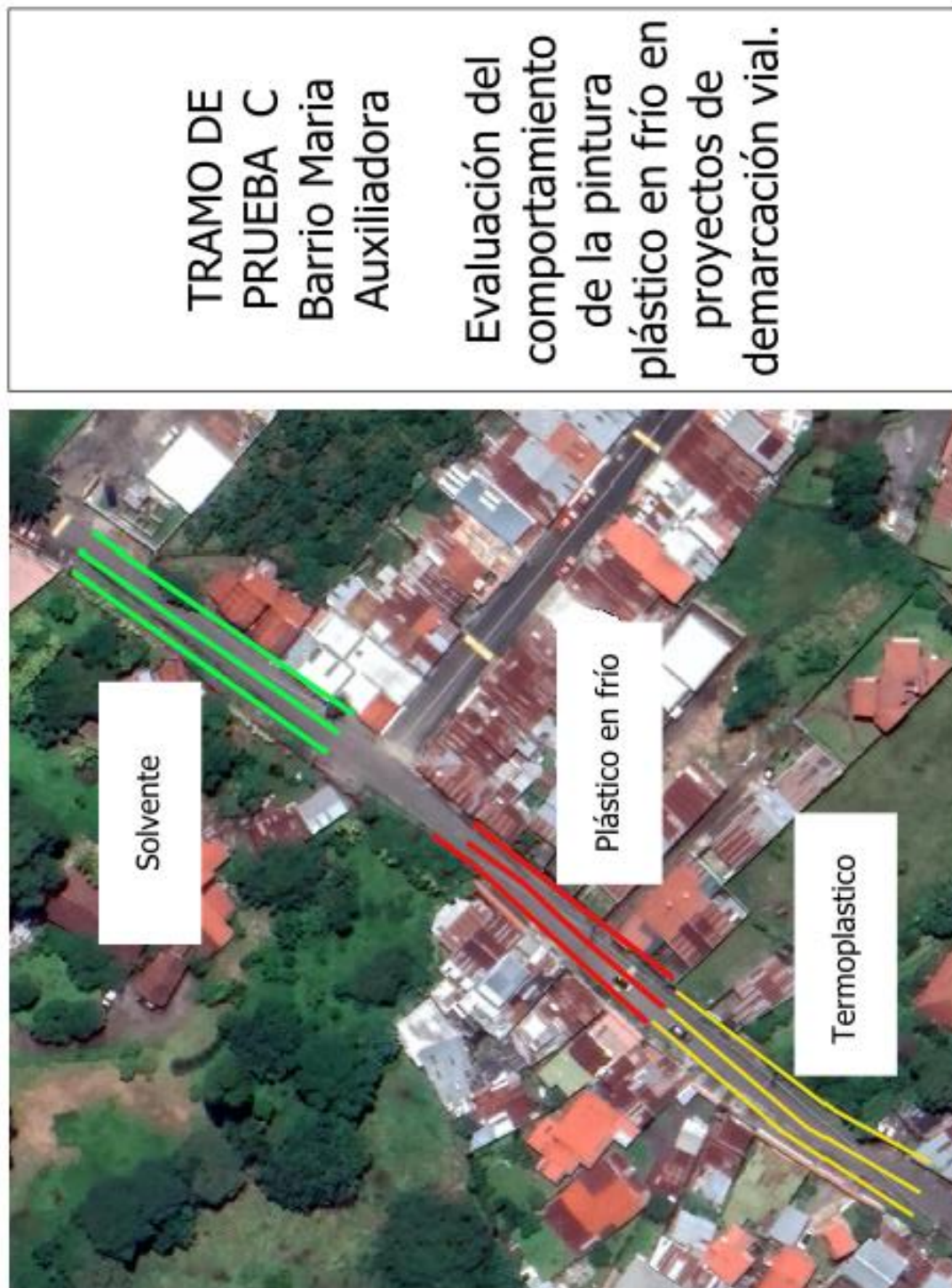
7.6 APENDICE F: Paño de prueba de B Barrio El Socorro

TRAMO DE
PRUEBA B
Barrio El Socorro

Evaluación del
comportamiento
de la pintura
plástico en frío en
proyectos de
demarcación vial.



7.7 APENDICE G. Paño de prueba C, María Auxiliadora



7.8 APENDICE H: Paño de prueba D, María Auxiliadora Arriba-Abajo

TRAMO DE
PRUEBA D
LINEA AMARILLA
Evaluación del
comportamiento
de la pintura
plástico en frío en
proyectos de
demarcación vial.



7.9 APENDICE I: Calculo de ANOVA para retrorreflectividad

Análisis estadístico de la variabilidad de la desviación en el paño de Prueba de Barrio El Socorro, Color Blanco, primera medición

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Material Termoplástico	16	4878	304,88	1872,38
Pintura Plástico en Frío	17	3379	198,76	389,82

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	92804,71	1	92804,71	83,82	0,00	4,16
Dentro de los grupos	34322,81	31	1107,19			
Total	127127,52	32				

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Pintura Plástico en Frío	17	3379	198,76	389,82
Pintura Solvente	16	3992	249,50	1201,47

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	21216,58	1	21216,58	27,11	0,00	4,16
Dentro de los grupos	24259,06	31	782,55			
Total	45475,64	32				

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Material Termoplástico	16	4878	304,88	1872,38
Pintura Solvente	16	3992	249,50	1201,47

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	24531,13	1	24531,13	15,96	0,00	4,17
Dentro de los grupos	46107,75	30	1536,93			
Total	70638,88	31				

Análisis estadístico de la variabilidad de la desviación en el paño de Prueba de Barrio El Socorro, Color Amarillo, primera medición.

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Material Termoplástico	7	2028	289,71	699,90
Pintura Plástico en Frío	9	1030	114,44	166,78

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	120958,10	1	120958,10	306,02	0,00	4,60
Dentro de los grupos	5533,65	14	395,26			
Total	126491,75	15				

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Pintura Plástico en Frío	9	1030	114,44	166,78
Pintura Solvente	8	2396	299,50	1060,86

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	145040,01	1	145040,01	248,35	0,00	4,54
Dentro de los grupos	8760,22	15	584,01			
Total	153800,24	16				

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Material Termoplástico	7	2028	289,71	699,90
Pintura Solvente	8	2396	299,50	1060,86

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	357,50	1	357,50	0,40	0,54	4,67
Dentro de los grupos	11625,43	13	894,26			
Total	11982,93	14				

Análisis estadístico de la variabilidad de la desviación en el paño de Prueba de Barrio El San Francisco, Color blanco, primera medición

RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Pintura Plástico en Frío	17	3448	202,82	551,90
Pintura Solvente	17	4011	235,94	762,56

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	9322,62	1	9322,62	14,18	0,00	4,15
Dentro de los grupos	21031,41	32	657,23			
Total	30354,03	33				

RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Material Termoplastico	19	6537	344,05	1416,39
Pintura Plástico en Frío	17	3448	202,82	551,90

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	178956,89	1	178956,89	177,26	0,00	4,13
Dentro de los grupos	34325,42	34	1009,57			
Total	213282,31	35				

RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Material Termoplastico	19	6537	344,05	1416,39
Pintura Solvente	17	4011	235,94	762,56

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	104868,11	1	104868,11	94,59	0,00	4,13
Dentro de los grupos	37695,89	34	1108,70			
Total	142564	35				

Análisis estadístico de la variabilidad de la desviación en el paño de Prueba de Barrio El San Francisco, Color Amarillo, primera medición

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Material Termoplastico	9	2964	329,33	2658,75
Pintura Plástico en Frío	10	1330	133,00	250,00

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	182590,00	1	182590,00	131,97	0,00	4,45
Dentro de los grupos	23520,00	17	1383,53			
Total	206110,00	18				

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Pintura Plástico en Frío	10	1330	133,00	250,00
Pintura Solvente	8	2101	262,63	442,27

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	74678,40	1	74678,40	223,51	0,00	4,49
Dentro de los grupos	5345,88	16	334,12			
Total	80024,28	17				

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Material Termoplastico	9	2964	329,33	2658,75
Pintura Solvente	8	2101	262,63	442,27

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	18847,07	1	18847,07	11,60	0,00	4,54
Dentro de los grupos	24365,88	15	1624,39			
Total	43212,94	16				

Análisis estadístico de la variabilidad de la desviación en el paño de Prueba de Barrio María
Auxiliadora Color blanco, primera medición

RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Material Termoplástico	14	4714	336,71	805,60
Pintura Plástico en Frío	14	3304	236,00	722,46

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	71003,57	1	71003,57	92,93	0,00	4,23
Dentro de los grupos	19864,86	26	764,03			
Total	90868,43	27				

RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Pintura Plástico en Frío	14	3304	236,00	722,46
Pintura Solvente	16	4083	255,19	935,36

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	2748,93	1	2748,93	3,29	0,08	4,20
Dentro de los grupos	23422,44	28	836,52			
Total	26171,37	29				

RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Material Termoplástico	14	4714	336,71	805,60
Pintura Solvente	16	4083	255,19	935,36

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	49628,07	1	49628,07	56,71	0,00	4,20
Dentro de los grupos	24503,29	28	875,12			
Total	74131,37	29				

Análisis estadístico de la variabilidad de la desviación en el paño de Prueba de Barrio María
Auxiliadora Color amarillo, primera medición

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Material Termoplástico	8	1933	241,63	243,98
Pintura Plástico en Frío	9	1081	120,11	411,11

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	62536,77	1	62536,77	187,73	0,00	4,54
Dentro de los grupos	4996,76	15	333,12			
Total	67533,53	16				

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Pintura Plástico en Frío	9	1081	120,11	411,11
Pintura Solvente	6	1172	195,33	137,87

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	20370,18	1	20370,18	66,57	0,00	4,67
Dentro de los grupos	3978,22	13	306,02			
Total	24348,40	14				

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Material Termoplástico	8	1933	241,63	243,98
Pintura Solvente	6	1172	195,33	137,87

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	7347,15	1	7347,15	36,78	0,00	4,75
Dentro de los grupos	2397,21	12	199,77			
Total	9744,36	13				

Análisis estadístico de la variabilidad de la desviación en el paño de Prueba de Barrio María Auxiliadora Arriba-Abajo, color amarillo, primera medición

RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Material Termoplástico	12	3476	289,67	2312,61
Pintura Plástico en Frío	15	1565	104,33	71,38

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	228989,63	1	228989,63	216,53	0,00	4,24
Dentro de los grupos	26438,00	25	1057,52			
Total	255427,63	26				

RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Pintura Plástico en Frío	15	1565	104,33	71,38
Pintura Solvente	19	2838	149,37	642,91

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	17000,75	1	17000,75	43,27	0,00	4,15
Dentro de los grupos	12571,75	32	392,87			
Total	29572,50	33				

RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Material Termoplástico	12	3476	289,67	2312,61
Pintura Solvente	19	2838	149,37	642,91

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	144769,69	1	144769,69	113,43	0,00	4,18
Dentro de los grupos	37011,09	29	1276,24			
Total	181780,77	30				

7.10 APENDICE J: Calculo de ANOVA para desprendimiento de demarcación

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Primer medición Plastico en frío	11	1095	99,55	2,27
Primer medición Solvente	11	965	87,73	101,82
Primer medición Termoplástico	11	1100	100,00	0,00

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1065,15	2	532,58	15,35	0,00	5,39
Dentro de los grupos	1040,91	30	34,70			
Total	2106,06	32				

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Segunda medición Plástico en Frío	11	1080	98,18	21,36
Segunda medición Solvente	11	800	72,73	311,82
Segunda medición Termoplástico	11	1100	100,00	0,00

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	5115,15	2	2557,58	23,03	0,00	3,32
Dentro de los grupos	3331,82	30	111,06			
Total	8446,97	32				

7.11 **APENDICE K: Cálculo de ANOVA para Resistencia al Deslizamiento con Péndulo Británico**

RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Plástico en Frío	12	346	28,83	24,88
Solvente	4	111	27,75	40,92
Termoplástico	12	326	27,17	27,06

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	16,88	2	8,44	0,30	0,74	3,39
Dentro de los grupos	694,08	25	27,76			
Total	710,96	27				