

NUEVAS TECNOLOGÍAS EN RECUBRIMIENTOS RETROREFLECTANTES PARA DEMARCACIÓN VIAL

Verónica Vanesa Mechura

UTN·La Plata

LEM3C Centro de Investigaciones Viales

COMISIÓN DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS
Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación



NUEVAS TECNOLOGÍAS EN RECUBRIMIENTOS RETRORREFLECTANTES PARA DEMARCACIÓN VIAL

(Plan de Tesis aprobado por Resolución UTN CS N° 556/2017
y cambio de director por Resolución UTN CS N° 1486/2017)

VERÓNICA VANESA MECHURA

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

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



Facultad Regional La Plata
Universidad Tecnológica Nacional

AÑO 2021

Mechura, Verónica Vanesa

Nuevas tecnologías en recubrimientos retrorreflectantes para demarcación vial / Verónica Vanesa Mechura ; editado por Fernando Cejas. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : edUTecNe, 2021.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-4998-81-1

1. Construcción Vial. 2. Reflexiones. I. Cejas, Fernando, ed. II. Título.

CDD 388.041



Universidad Tecnológica Nacional – República Argentina

Rector: Ing. Héctor Eduardo Aiassa

Vicerrector: Ing. Haroldo Avetta

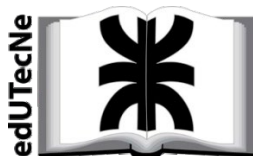
Secretaria Académica: Ing. Liliana Raquel Cuenca Pletsch



Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional La Plata

Decano: Ing. Fantini, Carlos

Vicedecano: Mag. Ing. Barceló, David Darío



edUTecNe – Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional

Coordinador General a cargo: Fernando H. Cejas

Director Colección Energías Renovables, Uso Racional de Energía,

Ambiente: Dr. Jaime Moragues.

Queda hecho el depósito que marca la Ley N° 11.723

© edUTecNe, 2021

Sarmiento 440, Piso 6 (C1041AAJ)

Buenos Aires, República Argentina

Publicado Argentina – Published in Argentina

ISBN 978-987-4998-81-1



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

Esta tesis se llevó a cabo en el LEMaC - Centro de Investigaciones Viales (Facultad Regional La Plata de la Universidad Tecnológica Nacional), bajo la dirección de la Dra. Guadalupe Canosa y la co-dirección del Dr. Héctor Luis Delbono.

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

Agradecimientos

A Guadalupe Canosa y Hector Luis Delbono, de la Facultad Regional La Plata de la Universidad Tecnológica Nacional, por su inestimable y valiosa dirección.

A los Miembros del Jurado, Dra. Marta Pagola, Dr. Adrián Nosetti y Dr. Jorge Reyna Almandos, por sus observaciones y comentarios que han sido sumamente enriquecedores para la Tesis.

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

Al personal del LEMaC - Centro de Investigaciones Viales, por el apoyo y colaboración; entre ellos Gerardo Botasso, Julián Rivera, Enrique Fensel, Marcelo Barreda, Anahí Lopez, Florencia Lajoinie, Eva Sosa, Oscar Rebollo, Enrique Giaccio, Ignacio Zapata, Gustavo Das Neves, Luis Aparicio, Luciano Brizuela, Adrián Oviedo, Anael Porro, Carolina Gerardi, Nicolás de Abajo, Mariano Damia, Sabrina Torres, Antonella Dalmarinni, Linda Cáceres y Nicolás Batistta.

Un agradecimiento especial a Enrique Giaccio que facilitó la realización de muchos de los ensayos.

Al Instituto de Investigaciones Físicoquímicas Teóricas y Aplicadas, en el área dirigida por Javier Amalvy, que me abrió las puertas brindándome un espacio donde realizar los ensayos.

A Fernanda Micakoski y Luciana Perez Angueira de la Facultad Regional Trenque Lauquen de la Universidad Tecnológica Nacional, por sus aportes y por el trabajo en conjunto en el Proyecto "Valoración del desempeño de modelos de soluciones viales a nivel de calzada para la conducción segura bajo condición de escasa visibilidad por niebla".

Al personal del CITEMA por la colaboración en ensayos de caracterización de las pinturas de demarcación vial.

A Omar Rodriguez y el centro CODAPLI por colaborar en la materialización de la cabina de inspección visual adaptada a las necesidades viales.

A Pablo Ixtaina y personal del Laboratorio de acústica y Luminotecnia de la Comisión de Investigaciones Científicas (LAL-CIC), por la colaboración en la evaluación de la retroreflexión de las muestras.

A Raúl Martinuzzi y personal de la empresa BECHA SA, por facilitar el acceso a equipamientos.

A Victor Sachetto por la colaboración en los datos de la estación Meteorológica EMA de la UTN FRLP.

A Dios, a mi esposo, hijos, padres, abuela, amigos y familia en general que me ayudaron de manera directa e indirecta en la búsqueda del título de Doctora en Ingeniería, mención Materiales.

Las marcas viales desarrollan un rol fundamental sobre los caminos, ya sean urbanos o rurales, debido a que son las encargadas de brindar seguridad al conductor. Dichas marcas se suelen materializar mediante la combinación de los materiales base (pinturas, termoplásticos o plásticos en frío), con el agregado de microesferas de premezcla y de sembrado. Los materiales base se diferencian, según su modo de aplicación, por cómo impactan en el medio ambiente y en la salud de las personas, y en cuanto a su durabilidad.

Desafortunadamente, hay pocos lineamientos que sugieren el tipo de material que conviene utilizar y, a menudo, el único criterio de selección es el costo inicial del mismo. Este aspecto puede terminar en una falla de durabilidad, mala retroreflectividad y aumento de los costos a largo plazo. Las marcas inadecuadas sobre el pavimento o mal mantenidas son consideradas como uno de los factores que contribuyen a los accidentes automovilísticos. Es esencial para aplicar la señalización del pavimento, disponer del material adecuado con el fin de aumentar la seguridad pública y reducir los accidentes de los vehículos. Si bien es importante la inversión en el mantenimiento de las rutas, incluyéndose la señalización horizontal, se ha demostrado que el aumento de la inversión en mantenimiento resulta más eficaz si va acompañado de un apoyo regulatorio, ya sea sancionador o limitador. Para esto, se requiere contar con ensayos de laboratorio sencillos que permitan ser correlacionados con el comportamiento de los materiales en servicio.

Para evaluar la durabilidad de los materiales viales existen ensayos exclusivos que van desde pruebas de campo a equipos de gran escala denominados Simuladores de Desgaste. Dichos métodos requieren un tiempo considerable de ensayo para obtener el resultado y son muy costosos. Por otra parte, para evaluar la resistencia a la abrasión, se utilizan métodos generales para todo tipo de pinturas. En estos últimos métodos, se ha encontrado una falencia en la evaluación en servicio relacionada con el comportamiento ante la presencia de agua. Se sabe que el agua es un plastificante del polímero que reduce la resistencia mecánica del film debido a que el agua incluida en el mismo degrada sus propiedades.

La problemática planteada pone en evidencia que es necesario realizar un análisis más exhaustivo de los materiales para poder caracterizarlos y conocer su comportamiento en condiciones de servicio. Por este motivo, se estudia el desarrollo de procedimientos de ensayo, de costo accesible y sencilla ejecución, basados en la utilización de equipos de uso vial, que sean capaces de predecir en laboratorio el comportamiento de las

distintas pinturas cuando se vean sometidas al tránsito. En el área vial, relacionable con el ensayo mediante simuladores de desgaste, se encuentra la técnica de los ensayos acelerados de pavimentos (APT). Una de las técnicas de APT es el ensayo de “rueda cargada” (WTT: Wheel Tracking Test) que se realiza en pavimentos asfálticos para determinar problemas de ahuellamiento. Se considera este ensayo debido a que permite acondicionar la temperatura y simular el tránsito sobre las marcas viales controlando el número de pasadas de ruedas. Otro de los ensayos considerados es el de “abrasión por vía húmeda” (WTAT: Wet Track Abrasion Tester). Este ensayo permite simular la condición de desgaste con agua, inundando la muestra. Se considera su efecto tanto en la pintura mediante la evaluación de la pérdida de peso, como en la marca vial con el deterioro de las propiedades esenciales. Otro de los equipos que se implementan para evaluar el desgaste de las pinturas es el denominado ensayo de Pulimento Acelerado de Áridos. En este caso, se busca conocer la pérdida de peso por el efecto del tránsito y del agua. En todos los ensayos mencionados, las metodologías implementadas se aplican al estudio de pinturas acrílicas base acuosa y base solvente. Por último, se analiza la absorción de la película de pintura como fenómeno relacionado con la posibilidad de ensuciarse de la misma.

En la implementación de los ensayos planteados se han encontrado diferencias de comportamiento. Por este motivo, se decide poner en evidencia las fallas en servicio de las marcas viales mediante la aplicación de los materiales en estudio en una nueva senda peatonal en el acceso a la Facultad. Para el análisis, se despliega la información técnica de los materiales utilizados, las condiciones ambientales tanto del día de aplicación como de los períodos posteriores y, los valores de los parámetros de visibilidad obtenidos en el día de la aplicación.

Finalmente, de los métodos implementados y del análisis de la prueba de campo, se encuentra en el ensayo de Pulimento Acelerado una herramienta eficaz en la valoración de los materiales base de demarcación vial, tanto por la rapidez del ensayo/adquisición de los resultados como por la posibilidad de ensayar varias pinturas simultáneamente bajo las mismas condiciones. Además, los otros ensayos implementados, WTT y WTAT, tienen la ventaja que por sus dimensiones permiten evaluar la variación de la retrorreflexión y resistencia al deslizamiento. Por último, es importante mencionar que se evidencia una relación entre la tendencia a ensuciarse de los materiales viales con la velocidad de absorción, ya que a pocas horas la absorción incrusta la suciedad en la película.

1.1. La temática analizada y el enfoque adoptado

La señalización horizontal es uno de los elementos viales que guarda mayor relación con la seguridad en la carretera porque le permite al conductor mantener el vehículo dentro del carril de tránsito y planear la tarea de conducción hacia adelante. El tránsito ha experimentado un crecimiento sin precedentes durante las últimas décadas, principalmente, en los países más desarrollados. Esto lleva a que los organismos de la gestión de tránsito presentes en cada institución estudien nuevos sistemas de control y mantenimiento (Álvarez, 2007). En la actualidad, la mejora de la seguridad vial se lleva a cabo mediante cuatro tratamientos principales: ampliación de la carretera, renovación de la señalización vertical, repintado de la señalización horizontal y renovación de la superficie de la vía.

Es importante destacar que la vida útil de la demarcación horizontal es, en términos relativos, corta si se compara con otros elementos de la carretera. Por ello, vemos que la importancia asociada a la seguridad vial es tan alta que su implantación y correcta conservación tienen carácter prioritario. Las marcas viales se usan para proveer información de manera apropiada, tanto a los conductores como a los peatones. Ya sean líneas o pictogramas, deben transmitir un mensaje fácilmente entendible por el usuario (Calavia, 1999).

En ocasiones, el estado de la vía es el causante de un accidente, o colabora de forma directa o indirecta en el mismo dependiendo de la cantidad y características de los obstáculos que se encuentran en la trayectoria. Entre las posibles causas se hallan, obviándose las imprudencias cometidas por algunos conductores y las fallas mecánicas que pudieran ocurrir al móvil, las deficiencias en el trazado del camino y su diseño geométrico, mala conservación de los pavimentos o un inadecuado o deficiente señalamiento (Chavez, circa 2008).

Carlson et al. (2009) presentan un estudio con la finalidad de estimar factores de reducción de accidentes por varias medidas de señalización de pavimentos. En su investigación, destacan que los estudios sobre choques, tanto los recientes como los de más de medio siglo, han demostrado de manera concluyente que agregar líneas de borde a las carreteras rurales de dos carriles puede reducir los choques y las muertes.

Los estudios de Miller (1992) demuestran que, en general, la presencia de solo líneas centrales y de borde puede reducir los accidentes en un 20 %.

La retrorreflectividad es un fenómeno óptico esencial en condiciones de iluminación nocturna que compensa la capacidad visual del conductor para detectar y prevenir peligros.

A continuación, se presentan los resultados de las estadísticas registradas oficialmente en Argentina durante el año 2020 con un total de 3138 muertos. El porcentaje de siniestros fatales en zona urbana (calles y avenidas) concentran el 46 % de los casos y, por otro lado, considerando la franja horaria de ocurrencia de estos siniestros fatales se producen en un 53% de los casos en condiciones nocturnas. El año 2020 presenta condiciones particulares debido a las restricciones relacionadas con la Pandemia Covid-19, tales como ASPO (Aislamiento Social Preventivo y Obligatorio) y DISPO (Distanciamiento Social Preventivo y Obligatorio). Por este motivo, adicionalmente se revisan los datos correspondientes al año 2018 disponible en el Observatorio Vial. Se registran 5493 muertes en ese año y, se mantienen las predominancias indicadas anteriormente. De esta manera, en el año 2018, las ocurrencias de accidentes fatales se concentraron en un 50,9 % de los casos en horarios nocturnos (Fuente de datos: Observatorio Vial, 2021).

En efecto, en la conducción nocturna, el cerebro se ve forzado a recibir y procesar la información dentro de lo que permite el haz de luz del vehículo, generando una situación de fatiga y estrés al incrementarse la velocidad, debido a la incompatibilidad entre los requerimientos del cerebro y las restricciones impuestas por las condiciones ambientales. La agudeza visual desempeña un escaso papel ya que los objetos se distinguen solo por apreciación de las distintas intensidades de luminosidad que presentan (Chavez, circa 2008).

Es notorio que la falta de señalización o su deterioro, tiene repercusión directa e inmediata en la circulación de los vehículos, siendo un factor determinante en la seguridad vial. La señalización horizontal se materializa mediante marcas viales que están constituidas por un conjunto de líneas longitudinales y transversales, signos y símbolos en la superficie de los pavimentos.

Las marcas viales se pueden construir *in situ* mediante la aplicación directa sobre la calzada (sustrato) de un sistema de señalización vial horizontal constituido por un

material base, que pueden ser termoplásticos, pinturas o plásticos en frío, con la adición de microesferas de premezcla y/o de sembrado (Ministerio de Fomento, 2012). Los materiales base se diferencian según su forma de aplicación, por cómo impactan en el medio ambiente y en la salud de las personas, y en cuanto a su durabilidad.

Los termoplásticos son una mezcla compuesta por sustancias minerales de granulometría gruesa (hasta 700 micras), una resina y un plastificante (ambos en forma sólida granular). Además, contienen microesferas de vidrio premezcladas, un aceite mineral especial que ayuda a controlar la viscosidad de aplicación y plastificar el conjunto y un pigmento que le da color. Estos materiales carecen de disolventes, el calor fluidifica el producto para permitir su aplicación. Se calientan a temperaturas que varían, dependiendo del producto, entre 180 °C y 220 °C. Una vez aplicado sobre el pavimento se vuelven sólidos de manera inmediata, permitiendo la apertura al tránsito en poco tiempo.

Las pinturas están compuestas por resinas (históricamente se han utilizado resinas de caucho clorado y más recientemente están siendo reemplazadas por mezclas acrílico-estirenadas, alquídicas-acríticas o 100 % acrílicas), pigmentos (funcionales y cargas), solventes y numerosos aditivos. Las pinturas contemporáneas base solvente se formulan utilizando resinas acrílicas que se disuelven en solventes orgánicos como ésteres o cetonas. El solvente sirve solo para hacer que la pintura sea líquida y luego escapa a la atmósfera como COV (Compuesto Orgánico Volátil), lo que en el caso de una pintura para señalización vial con alto contenido de sólidos alcanza los 400-500 g/l (aprox. 25 %). En cambio, en una pintura base acuosa típica para señalización vial, el contenido de COV es inferior a 50 g/l (aprox. 2 %) según los aditivos utilizados (Babic et al., 2015).

En diversas regiones, como parte del movimiento mundial para limitar las emisiones de COV y de residuos peligrosos y, con el objeto de minimizar los efectos adversos en la salud humana y buscar un mejor desempeño, las pinturas base solvente lentamente se están reemplazando por las pinturas base acuosa (Mouton, 2013; Moreira et al., 2002).

Por último, los plásticos en frío consisten en un sistema de dos componentes. Es necesario mezclarlos hasta conseguir una adecuada homogeneidad y aplicar el material antes de sobrepasar el tiempo de vida útil (variable dependiendo de la mezcla de los productos y de la temperatura), ya que endurece. Deben seguirse las instrucciones

respecto a las proporciones de mezcla de los componentes, ya que una alteración puede reducir notablemente la durabilidad.

Desafortunadamente, hay pocos lineamientos que sugieren el tipo de material que conviene utilizar y, a menudo, predomina el costo inicial para seleccionarlo. Este aspecto puede terminar en una falla de durabilidad, inapropiada retrorreflectividad y aumento de los costos a largo plazo (Montebello et al., 2000). Las marcas inadecuadas sobre el pavimento y mal mantenidas son consideradas como uno de los factores que contribuyen a que ocurran los accidentes automovilísticos.

Es esencial para aplicar la señalización del pavimento, disponer del material adecuado para todas las condiciones climáticas con el fin de aumentar la seguridad pública y reducir los accidentes de los vehículos (Fares et al., 2012). Si bien es importante la inversión en el mantenimiento de las rutas, incluido el mantenimiento de la señalización horizontal, se ha demostrado que el aumento de la inversión en mantenimiento resulta mucho más eficaz si un apoyo regulatorio, ya sea sancionador o limitador, sustenta la elección del material (Albalate et al., 2013).

A continuación, se detallan las características principales que deben cumplir los materiales para Demarcación Vial Horizontal adaptadas a la condición en servicio:

1. Deben ser resistentes a la abrasión, considerándose la condición de pavimento seco y de pavimento húmedo debido a la lluvia.
2. Deben resistir las agresiones de la intemperie: tales como el sol (no debe degradarse con los rayos ultravioleta), la lluvia y la reacción del propio sustrato.
3. Deben presentar una buena resistencia al agua y baja absorción. La película de pintura va a estar en contacto en forma alternada a ciclos de humectación y secado. En estas condiciones no debe manifestarse pérdida de adhesión, ablandamiento o elevada retención (hinchamiento). Esta propiedad está relacionada con la cantidad de agua que resulta absorbida en los espacios intermoleculares del polímero, en todas las interfaces presentes en el sistema, poros, discontinuidades para que la película permanezca en condiciones de equilibrio.
4. Deben ser visibles de día e identificables a una distancia determinada de seguridad, tanto de día, de noche y bajo cualquier condición climática, sin comprometer las

propiedades antideslizantes de la superficie (Calavia, 2013). Es de resaltar, que estas propiedades están relacionadas con los requisitos esenciales de una marca vial, los cuales son luminancia, retrorreflexión y resistencia al deslizamiento. Las mismas se estudian en el Capítulo 2.

5. Deben presentar elevada adhesión seca y húmeda de la película con el sustrato. La adhesión de la película resulta sensiblemente menor en condiciones húmedas ya que el agua en la interfaz, por su característica polar y de reducido tamaño, compite con el material polimérico. Es importante que la marca ofrezca un correcto “*grip*” (“agarre”) sobre el pavimento donde está situada.

Es posible establecer las características de los materiales para Señalización Horizontal dependiendo del entorno de aplicación. Podemos mencionar que en ciudades se tiene una mayor exigencia con respecto al tiempo de secado y mayores requisitos en la evaluación de la resistencia al deslizamiento, a la abrasión y al ensuciamiento. Por ejemplo, en la Figura 1-1 se presenta una comparación fotográfica de un reordenamiento vial mediante la aplicación de marcas viales en una esquina muy transitada del Microcentro en la Provincia de Buenos Aires. En la misma, se evidencia la importancia de intervenir zonas urbanas con la finalidad de ordenar el flujo de tránsito y proteger a los peatones. Además, estas imágenes resaltan la importancia de los requisitos mencionados debido a que, generalmente en casos urbanos, las marcas viales se encuentran en puntos críticos donde los vehículos pueden frenar o girar.



Figura 1-1. Demarcación horizontal en zona urbana

Fuente: Cristacol, 2016

En cambio, en carreteras o autovías, se considera que la propiedad más importante es la visibilidad nocturna. En la Figura 1-2 se observan dos imágenes de un mismo tramo de ruta en condición diurna y nocturna que evidencian la importancia de que las marcas viales sean retrorreflectantes.



Figura 1-2. Visibilidad diurna y nocturna en rutas

Fuente: García, 2011

Existe una necesidad de la industria relacionada a las marcas viales, tanto de los fabricantes como de las empresas que realizan la aplicación, de establecer una valoración del desempeño de los materiales considerando las acciones a las que están sometidos en servicio.

En el desarrollo de esta tesis se analiza la implementación de ensayos con equipos viales para el estudio del comportamiento en servicio de las marcas viales. Como se verá en los capítulos posteriores, existen ensayos para evaluar el desempeño a través

de la retroreflexión y de los parámetros relacionados con la resistencia al deslizamiento. Estos ensayos tienen la desventaja que, dependiendo del método utilizado, requieren de tiempo de evaluación o de equipos especiales.

En el desarrollo de la tesis se pretende, además de lo mencionado de realizar un análisis del comportamiento de estas propiedades en servicio con equipos viales, avanzar con un ensayo del desempeño de los materiales base que, en este caso, se basa en la abrasión en pinturas.

De esta forma, conocer el desempeño de la demarcación vial permite planificar de manera más eficiente el mantenimiento de las carreteras, mejorando de este modo la seguridad. Y, por otro lado, conocer la durabilidad de los materiales base permite tomar una decisión al momento de elegir los productos a utilizar en distintos casos. Debido a que existen gran variedad de materiales y combinación posible es necesario limitar el trabajo. En la presente tesis, se estudia el comportamiento de pinturas acrílicas con la justificación presentada en los próximos capítulos.

1.2. Antecedentes en la evaluación de los materiales de demarcación vial

La Ley Nacional de Tránsito y Seguridad Vial de Argentina, reglamentada por Decreto Nacional N°779/95, establece que: *“...la vía pública será señalizada y demarcada conforme el sistema uniforme que se reglamente de acuerdo con los convenios internos y externos vigentes.”*. En el mencionado Decreto, se aprueba el Anexo L “Sistema de señalización vial uniforme”. El mismo, en su Capítulo VI establece: *“...CONCEPTO. Las marcas viales o demarcación horizontal son las señales de tránsito demarcadas sobre la calzada, con el fin de regular, transmitir órdenes, advertir determinadas circunstancias, encauzar la circulación o indicar zonas prohibidas. El material debe ser antideslizante, resistente y de un espesor no mayor a CINCO MILIMETROS (5 mm), con excepción de las tachas y separadores de tránsito.*

Las demarcaciones serán uniformes en diseño, posición y aplicación. Tal como para los demás dispositivos de control de tránsito, es necesario su uniformidad a fin de que puedan ser reconocidas y entendidas instantáneamente por los usuarios de la vía...”

En otro de los ítems, establece *“...b) REFLECTIVIDAD: En autopistas, semiautopistas, rutas, túneles y puentes, accesos y egresos de las vías mencionadas y en calles y avenidas de intenso volumen vehicular, toda la demarcación debe ser reflectiva.*

Cuando sea necesario demarcar líneas divisorias de sentidos opuestos de dirección, de borde de calzada, de pare, isletas canalizadoras o delimitadoras de obstáculos, sendas

peatonales y marcas o leyendas de cruces ferroviarias, "CEDA EL PASO" y "PARE", también debe utilizarse material reflectivo...".

Es importante mencionar que la Ley 13927 de la Provincia de Buenos Aires, reglamentada por el Decreto 532/09, establece que *"...La provincia de Bs. As. adhiere, en cuanto no se opongan a las disposiciones de las presentes, a las Leyes Nacionales 24449 y 26363, que como anexos se acompañan..."*.

Las normas IRAM contemplan el tema de pinturas de demarcación en tres documentos de referencia donde se establecen los requisitos y métodos de ensayo de los materiales de demarcación y microesferas de vidrio empleadas. La primera es la Norma IRAM 1212/1971 "Recubrimientos para demarcación de pavimentos. Recubrimientos termoplásticos retrorreflectantes" que actualmente se encuentra en revisión. La segunda es la Norma IRAM 1221/2018 que establece los "Requisitos de las pinturas retrorreflectantes y no retrorreflectantes" y, al igual que la anterior, se encuentra en revisión. La tercera es la Norma IRAM 1225/2014 que establece la "Clasificación, los requisitos y los métodos de ensayo de las microesferas de vidrio que se emplean en la demarcación de pavimentos urbanos y viales". Actualmente, se encuentra en tema para el tratamiento de una nueva "Norma de Pinturas para demarcación de pavimentos: Pintura vial base agua", aún sin su esquema.

También se utiliza el "Manual de Señalamiento Horizontal" de la Dirección Nacional de Vialidad (2012), donde se establecen principalmente los requerimientos geométricos y características para considerar en la aplicación de los revestimientos, en las vías en la República Argentina.

En algunos países, para evaluar el comportamiento de las marcas viales se utiliza el "ensayo de referencia" sin norma de aplicación. El ensayo consiste básicamente en aplicar el material en un tramo de ruta y observar su evolución en el tiempo siendo muy utilizado en la Argentina para analizar el comportamiento de los distintos materiales existentes. Calavia (2007), establece que el ensayo posee una alta validez ya que la posición de la marca vial está bien definida (en el centro de cualquier ruta de doble carril). La aplicación de la pintura se realiza de una forma real y el número de pasos de rueda (que si bien no es muy elevado) refleja la realidad, pero destaca la pobre fiabilidad, baja repetitividad y nula reproducibilidad, ya que el resultado depende enormemente de la localización de la carretera de ensayo. El mismo es válido para el caso en que la carretera en la que va a ser aplicada la marca vial resulte de idéntico requerimiento o

fuera similar a aquella en la que se ha realizado. A su vez, se resalta que en este método las medidas de comportamiento son difíciles y costosas de realizar.

En Europa existe un marco normativo más amplio contando, entre otras, con normas que describen los métodos de ensayo del comportamiento de las marcas viales aplicadas sobre calzada (Norma UNE EN 1436, 2009), la determinación de las características que deben cumplir los materiales para señalización vial horizontal (Norma UNE EN 1871, 2000) y los métodos de laboratorio necesarios para la identificación (Norma UNE EN 12802, 2012). En el año 2007, se realizó un estudio bajo el nombre Señalización Horizontal: “Proyecto durabilidad” que surgió de la necesidad de armonizar las normas, especificaciones y métodos de ensayo en el ámbito europeo para permitir la libre circulación de productos. Blanco et al. (CEN TC 226 WG, 2009) desarrollaron un estudio sobre los distintos métodos utilizados para evaluar la durabilidad en diversos países. Con ello, concluyeron que los métodos utilizados para evaluar los productos pueden ser de “Ensayos de Campo” bajo la Norma UNE EN 1824/12 y los de “Simuladores de desgaste” según la Norma UNE EN 13197/12.

El Ensayo de Campo consiste en realizar las marcas viales de una manera determinada a lo largo de un tramo de ruta con los materiales a evaluar y así, estudiar el comportamiento en el tiempo. Éste se utiliza en países como Dinamarca, Francia y Bélgica. Calavia (2007) plantea que se tiene una menor validez que en el ensayo de referencia, ya que se aplican de una forma en la que nunca pueden aplicarse en la práctica, solo funcionan un corto periodo de tiempo por el cual el vehículo se detiene y vuelve a avanzar, sucesivamente simulando ciclos. Asimismo, cuentan con una pobre fiabilidad ya que el ensayo depende de la localización de la carretera de ensayo. Una ventaja que tiene es que el número de pasos de rueda puede variar en un amplio intervalo, haciendo posible encontrar una correlación entre el desgaste y el comportamiento. Uno de los inconvenientes de la metodología es que resulta costoso evaluar el tránsito en cada una de las líneas. Por tal motivo, en Francia se utilizaron métodos como el de video-adquisición de datos o los sensores piezoeléctricos. En la Figura 1-3, se muestra una imagen de un campo de ensayo.



Figura 1-3. Campo de ensayo.

Fuente: Fors, 2015 "Nordic certification system for road marking materials"

Con respecto a los simuladores de desgaste, originalmente existían diversos equipos según la antigua Norma EN 13197/2002, pero luego de las investigaciones mencionadas, se determinó la validez solo de la "mesa giratoria" como simulador de tránsito (Norma EN 13197/2011). Dicho equipo está conformado por una mesa giratoria (parte móvil), de aproximadamente 6 metros de diámetro externo. Está compuesta por 4 ruedas neumáticas que permiten aplicar una carga de 300 kg. Las probetas son colocadas sobre un mecanismo plano sobre la mesa, la cual realiza un movimiento relativo que permite que las ruedas pasen repetidamente sobre las probetas. En este ensayo se utilizan ruedas comerciales. La Figura 1-4 presenta la vista general y el detalle de la rueda del Simulador de Desgaste "mesa giratoria" disponible en España.

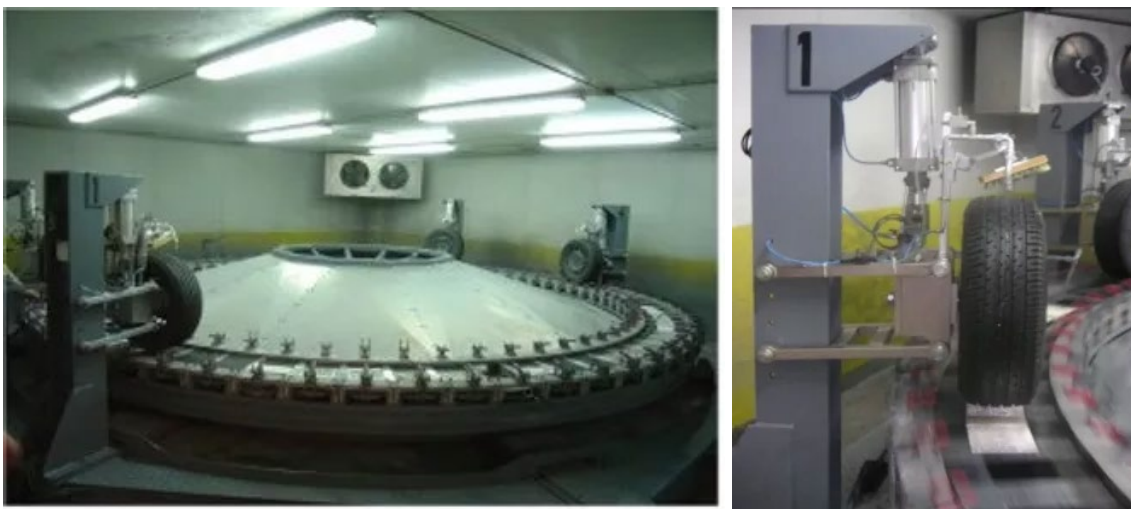


Figura 1-4. Simulador de desgaste "Mesa giratoria"

Fuente: <https://www.aetec.es/>

Según Calavia (2007), el ensayo tiene una validez aceptable, considerando que es artificial en el sentido de que las marcas viales no están expuestas al entorno real de una carretera. Dicha validez es mayor o menor según si se encuentra correlación entre los resultados en el simulador y las “situaciones reales”; por ejemplo, buscando reproducir la rugosidad de la carretera. Es muy importante destacar que es un equipo exclusivo para el ensayo de estos materiales y disponible en pocos lugares (Mouton, 2013).

En estos ensayos que utilizan los simuladores de desgaste, el desempeño se evalúa mediante la resistencia al deslizamiento con el uso del Péndulo Inglés, la Retrorreflexión, la Luminancia y el Color. El ensayo finaliza, como se indica en la norma de referencia, cuando los pasos de rueda superan determinado valor o algunos de los parámetros se encuentra por debajo del mínimo de aceptación.

Otro aspecto para considerar es la resistencia a la abrasión de las pinturas. En la Norma IRAM 1221/18, se estima el comportamiento de la película seca mediante la caída de un abrasivo. En Europa, existen normas específicas donde se plantean dos ensayos de abrasión según la naturaleza del material a ensayar y si contienen microesferas de vidrio premezcladas, teniendo la opción de optar por el método de caída de un abrasivo (UNE 135203-2/10) o por el método Taber (UNE 135203-1/10). En relación con este último método, Babic et al. (2015) comparan la resistencia a la abrasión de pinturas acrílicas base solvente y base acuosa, en las que han encontrado un mejor comportamiento y una menor pérdida de peso por abrasión en las últimas. Estas experiencias también destacaron que los tiempos medidos de resistencia al secado y al lavado en las pinturas base acuosa resultan adecuados en condiciones favorables, aunque existe la advertencia del riesgo de lavado en caso de lluvia repentina en condiciones de baja temperatura y alta humedad. Este último aspecto, demuestra que la metodología de análisis presenta una falencia en cuanto a la evaluación del comportamiento en servicio de las pinturas ante la presencia del agua.

Por otro lado, existen ciertos aspectos de la durabilidad que pueden verse afectados por la compatibilidad con el sustrato sobre el que son aplicadas y, a su vez, dependen de las condiciones climáticas de su ubicación. Estos requisitos dependen de las propiedades físico-químicas del material base.

Como se sabe, el sustrato en servicio es un pavimento de hormigón o asfáltico, pero también puede darse el caso de que se aplique sobre un revestimiento existente. La compatibilidad con el pavimento se consigue ajustando la naturaleza química del material base al sustrato sobre el que van a ser aplicados mediante el agregado de una imprimación y se verifica, dependiendo del tipo de sustrato, mediante la evaluación de la resistencia al sangrado en pavimentos asfálticos según la Norma IRAM 1221/18 y la Norma UNE 1871/2000, donde se establecen las condiciones de ensayo. El mismo consiste en comparar las coordenadas cromáticas de la pintura aplicada sobre dos paneles de aluminio con distinto tratamiento. En uno de los paneles previamente se aplica material bituminoso con pincel y se coloca en condiciones de temperaturas indicadas en la norma. Una vez preparado el panel con el bitumen, se aplica la pintura sobre ambos paneles y se curan en condiciones controladas. Finalizado el período de tiempo, se evalúa la diferencia de color en ambos casos. En cambio, en el caso de pavimentos de hormigón se evalúa la resistencia a los álcalis según la Norma UNE 1871/2000.

Otro aspecto importante para considerar en el control de calidad de las pinturas es la adherencia de la película seca al sustrato. Dicha adhesión de la película de pintura es un fenómeno de naturaleza física y química. Las fuerzas de adhesión propiamente dichas se manifiestan generalmente en la interfase sustrato/película mientras las de adhesión interna (cohesión) tienen lugar en el interior de la propia película. El grado de limpieza del sustrato, su macrotextura y el método de aplicación por un lado y, las variables de formulación/elaboración de la pintura por el otro, inciden sobre la tensión de adhesión. La adhesión en húmedo resulta en general inferior o sensiblemente inferior a la adhesión en seco (Giudice et al., 2009).

1.3. Objetivos de la tesis

1.3.1. Objetivo General

Implementar ensayos utilizados en el ámbito vial para simular el desgaste producido en servicio de las pinturas acrílicas de demarcación vial con la finalidad de obtener una valoración de su desempeño.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar e implementar equipamiento y metodologías de ensayos viales que permitan evaluar el comportamiento de los sistemas de señalamiento vial en servicio.
- Establecer e implementar metodología de ensayos simples para evaluar características de las pinturas en servicio.
- Comparar el comportamiento experimental en laboratorio con la experiencia obtenida con una prueba de campo sobre un camino existente.

1.4. Contenido y alcance de la investigación

Para lograr los objetivos propuestos se realizan revisiones bibliográficas de los materiales existentes en el mercado y de los estudios teóricos, de laboratorio y de campo más utilizados para evaluar la durabilidad o desempeño de los recubrimientos viales.

Teniendo en cuenta los antecedentes recopilados de interés y los equipamientos viales disponibles, se procede a realizar los ensayos y distintos procedimientos para evaluar los materiales. Para ello, se consideran los equipos utilizados en el ámbito vial y su adaptación a los recubrimientos viales limitando el alcance al estudio de pinturas acrílicas base acuosa y base solvente. La tesis se divide en seis capítulos que permiten al lector conocer las propiedades de los materiales utilizados, los ensayos disponibles y los distintos ensayos implementados para afrontar la problemática planteada durante todo el abordaje de la misma. Finalmente, se agregan dos anexos con información para complementar la tesis.

El presente capítulo "Introducción" justifica de forma resumida el interés por llevar a cabo la tesis y se describe el contenido de cada una de las partes que integran este documento.

En el Capítulo 2 de "Estado del arte", se presenta una introducción a los materiales utilizados para conformar los recubrimientos retrorreflectantes utilizados en la demarcación vial. Se explican las propiedades de las marcas viales y los principales factores que las afectan. Por último, en este capítulo se estudia el fenómeno de abrasión en las pinturas y los modelos de degradación de la retrorreflexión.

En el Capítulo 3 de “Evaluación de los recubrimientos de demarcación vial”, se presenta un resumen de aspectos relacionados al desempeño de los materiales viales y las distintas consideraciones en las especificaciones desarrolladas por los departamentos de transporte de los EEUU. Finalmente, se presentan los distintos dispositivos de ensayo diseñados a nivel mundial, con objeto de valorar la durabilidad de la marca vial y la abrasión de los materiales base. Se plantea la problemática hallada en cuanto a la evaluación de los materiales comerciales y se detallan los equipos utilizados en el ámbito vial que se implementan para estudiar el comportamiento en servicio de las marcas viales.

En el Capítulo 4 de “Caracterización de los materiales, metodología y discusión de resultados”, se detallan los ensayos de caracterización de las pinturas y de las microesferas utilizadas en la tesis. Es importante mencionar que se limita el alcance al estudio de las pinturas acrílicas base acuosa y base solvente. Posteriormente, se presenta la metodología y los resultados de los diferentes ensayos adaptados para la evaluación de los materiales en servicio. Con el objeto de conocer el desgaste y el efecto que genera el tránsito sobre la demarcación horizontal se implementa el ensayo de “rueda cargada” (WTT: *Wheel Tracking Test*) utilizado en pavimentos asfálticos para determinar problemas de ahuellamiento. Este ensayo se encuentra bajo la Norma UNE EN 12697-22/03 y se adapta a probetas de hormigón donde se aplican los recubrimientos en estudio. Debido a que, en la condición en servicio, los materiales se encuentran ante el efecto del agua y tránsito en conjunto, se implementan el ensayo de “Abrasión por vía húmeda” o WTAT (de su sigla en inglés) utilizado para lechadas asfálticas según Norma ASTM 3910/1998 y el ensayo de Pulimento Acelerado de Áridos según Norma NLT-174/1993 para simular dicha acción. También se analiza la absorción de la película de pintura como fenómeno relacionado con la posibilidad de ensuciarse por partículas que pueden ingresar a la matriz a través de este fenómeno físico. Se detallan los pasos para la confección de las probetas, sustratos utilizados y procedimiento de cada uno de los ensayos, de manera que puedan ser reproducidos sencillamente y se discuten los resultados obtenidos.

En el Capítulo 5 de “Prueba de campo”, se presenta el procedimiento realizado para la implementación de la senda peatonal en el acceso a la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata y las conclusiones relativas a lo observado en los materiales. Los análisis aquí realizados corresponden a dicha zona y no son necesariamente extensivos a otras.

En el Capítulo 6 de “Conclusiones generales”, se realiza un análisis de los resultados obtenidos en los distintos ensayos implementados y se resaltan las conclusiones más importantes. A partir de ellas se indican las posibles líneas de investigación futuras.

El desarrollo de esta tesis se enmarca dentro del Proyecto I+D Interfacultad denominado “Valoración del desempeño de modelos de soluciones viales a nivel de calzada para la conducción segura bajo condición de escasa visibilidad por niebla” (TVTUNLP0004302), donde se fusionan la Facultad Regional La Plata y la Facultad Regional Trenque Lauquen, de la Universidad Tecnológica Nacional.

Las tareas se desarrollaron en el LEMaC Centro de Investigaciones Viales perteneciente a la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata (UTN FRLP) y centro asociado a la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC PBA). Asimismo, en el desarrollo de la tesis surgieron vínculos con instituciones que permitieron el avance de todos los trabajos realizados. En una primera instancia se visitó las instalaciones de la empresa CRISTACOL SA que permitió conocer el proceso de fabricación de los materiales y tomar conocimiento de los inconvenientes y puntos de estudio de interés. Por otro lado, se realizó un Convenio de Cooperación y Asistencia técnica Recíproca con la empresa Becha SA de la ciudad de Rosario en la Provincia de Santa Fe. Este convenio nos permitió contar con material de análisis, así como realizar ensayos y mediciones en sus instalaciones como, por ejemplo, determinación de luminancia en iluminación difusa, retrorreflexión y tensión por adhesión.

Además, se utilizaron otras instalaciones de la UTN FRLP como el Centro CITEMA (también centro asociado CIC PBA) en el cual se analizaron las diferentes pinturas mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier. De igual manera, gracias a Convenios institucionales se realizaron ensayos en el Instituto de Investigaciones Físicoquímicas Teóricas y Aplicadas (INIFTA), en el área dirigida por el Dr. Javier Amalvy, utilizándose distintos equipos como el *Taber Abraser* y el equipo para la evaluación del Brillo de películas de pinturas entre otros. Se debe agregar que se cuenta con la colaboración del Laboratorio de Acústica y Luminotecnia (LAL) perteneciente a la CIC PBA quienes facilitaron su equipo retrorreflectómetro para realizar mediciones de muestras confeccionadas en el LEMaC y, además, el Instituto de Recursos Minerales (INREMI) centro asociado CIC PBA que permitieron el acceso a la Lupa electrónica y microscopio.

Referencias

ALBALATE, D., FERNÁNDEZ, L., YARYGINA, A., "The road against fatalities: Infrastructure spending vs. regulation??", *Accident Analysis & Prevention*, 59, 227-239, 2013.

ÁLVAREZ, P., LÓPEZ-RODRÍGUEZ, F., CANITO, J. L., MORAL, F. J., CAMACHO, A., "Development of a measure model for optimal planning of maintenance and improvement of roads", *Computers & Industrial Engineering*, 52(3), 327-335, 2007.

BABIĆ, D., BURGHARDT, T. E., BABIĆ, D., "Application and characteristics of waterborne road marking paint", *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, vol. 5(2), 150-169, 2015.

CALAVIA D., "Demarcación Horizontal", *Revista Carreteras*, Argentina, n 157, pp. 58 a 66, 1999.

CALAVIA D., "La durabilidad de la demarcación horizontal. Experiencia en la Unión Europea", Comunicación presentada en el Pre XV Congreso de Vialidad y Tránsito, Ciudad de Buenos Aires, Argentina, 2007.

CALAVIA, D., "Progreso en señalización horizontal y seguridad viaria", *Carreteras: Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera*, (190), 27-40, 2013.

CARLSON, P. J., PARK, E. S., ANDERSEN, C. K., "Benefits of pavement markings: A renewed perspective based on recent and ongoing research", *Transportation research record*, 2107(1), 59-68, 2009.

CEN TC 226 WG. 2 Horizontal Signalisation: "Durability Project "Part 2 - Report for the wear simulator tests. Report presented by CEDEX (Manual Blanco); AETEC (David Calavia) and UCM (Miguel Sánchez) – SPAIN, 2009.

CRISTACOL, "Señalamiento horizontal. Marcación de áreas", 2016.

FARES, H., SHAHATA, K., ELWAKIL, E., EWEDA, A., ZAYED, T., ABDELRAHMAN, M., BASHA, I., "Modelling the performance of pavement marking in cold weather conditions", *Structure and Infrastructure Engineering*, 8(11), 1067-1079, 2012.

FORS, C; JOHANSEN, T. C.; LUNDKVIST, S., "Nordic certification system for road marking materials", 2015 (<http://vti.diva-portal.org/smash/get/diva2:1191156/FULLTEXT01>).

GARCIA, D., "Demarcación Vial". Disponible en: <https://cupdf.com/document/principios-de-senalizacion-y-demarcacion-vial-definicion-las-demarcaciones.html>, 2011.

GIUDICE, C., PEREYRA, A., "Tecnología de Pinturas y Recubrimientos: Componentes, Formulación, Manufactura y Control de Calidad", Editorial edUTecNe (ISBN 978-987-25360-2-2), Facultad Regional La Plata, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina, 2009.

IRAM, "IRAM 1212: Recubrimientos para demarcación de pavimentos. Recubrimientos termoplásticos retrorreflectantes", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina, 1971.

IRAM, "Norma IRAM 1221: Recubrimiento para demarcación de pavimentos. Pintura vial retrorreflectante y no retrorreflectante", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina, 2018.

IRAM. "Norma IRAM 1225: Recubrimientos para demarcación de pavimentos. Microesferas de vidrio", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina, 2014.

Manual de Señalamiento Horizontal Dirección Nacional de Vialidad aprobado por resolución 2501/2012. Buenos Aires, Argentina 2012. Disponible en: <http://www.aacarreteras.org.ar/2019/pdfs/documentos-tecnicos/msh-ebook.pdf>.

MILLER, T., "Benefit-cost analysis of lane marking", Transportation research record 1334, 38-45, 1992.

MINISTERIO DE FOMENTO, "Guía para el proyecto y ejecución de obras de señalización horizontal", Editorial Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento (ISBN 978-84-498-0926-2), España, 2012.

Ministerio de justicia y derechos humanos. Presidencia de la Nación. (s.f.). Anexo al artículo 22. Anexo L. Sistema de señalización vial uniforme. Disponible en: <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/30000-34999/30389/dto779-1995-anexoL.htm>.

Ministerio de justicia y derechos humanos. Presidencia de la Nación. (s.f.). Tránsito y seguridad vial. Decreto Nacional N°779/95. Decreto reglamentario de la ley de tránsito y seguridad vial. Disponible en: <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/30000-34999/30389/norma.htm>.

MONTEBELLO, D., SCHROEDER, J., "Cost of pavement marking materials" (No. MN/RC-2000-11), Minnesota Local Road Research Board, 2000.

MOREIRA H. Y MENEGON R., "Sinalização Horizontal", São Paulo: Master Set Gráfica, 2003.

MOUTON, Y, "Organic materials in civil engineering". John Wiley & Sons, 2013.

UNE, "Norma UNE 135203-1: Equipamiento para la señalización vial. Señalización horizontal. Materiales. Ensayos de abrasión en laboratorio. Parte 1: Determinación de la resistencia a la abrasión mediante el método Taber", 2010.

UNE, "Norma UNE 135203-2: Equipamiento para la señalización vial. Señalización horizontal. Materiales. Ensayos de abrasión en laboratorio. Parte 2: Determinación de la resistencia a la abrasión mediante el método de caída de un abrasivo", 2010.

UNE, "Norma UNE EN 1436: Materiales para señalización vial horizontal. Comportamiento de las marcas viales aplicadas sobre la calzada", 2009.

UNE, "Norma UNE-EN 1824: Materiales para señalización vial horizontal. Pruebas de campo", 2012.

UNE, "Norma UNE EN 1871: "Materiales para señalización vial horizontal. Propiedades físicas", 2000.

UNE, “Norma UNE EN 12802: Materiales para señalización vial horizontal. Métodos de laboratorio para la identificación”, 2012.

UNE, “Norma UNE-EN 13197: “Materiales para señalización vial horizontal. Simuladores de desgaste”, 2002.

UNE, “Norma UNE-EN 13197: “Materiales para señalización vial horizontal. Simulador de desgaste. Mesa giratoria”, 2012.

2.1. Introducción

Las marcas viales cumplen un rol muy importante en la reducción de accidentes, además de guiar a los conductores por el camino que deben seguir. Las funciones de las marcas viales son dirigir el tránsito y prevenir a los conductores de obstáculos puntuales. Las marcas viales son superficies retrorreflectivas con la cualidad de reflejar gran parte del flujo luminoso que llega sobre ellas. Con el paso del tiempo, el tránsito y el clima las van deteriorando, por lo que requieren un cierto mantenimiento (Pankaj Kumar et al. (2014)).

La aplicación uniforme de las marcas en el pavimento para delinear la ruta y los carriles específicos para el tránsito son algunos de los aspectos más importantes de una carretera segura y eficaz. Las marcas viales pueden transmitir información a los usuarios de la carretera ya que ningún otro dispositivo puede controlar el tránsito. Éstas, proporcionan información continua a los usuarios, el posicionamiento del vehículo, y otras tareas importantes relacionadas con la conducción (Carlson et al., 2009).

La conducción consta de cuatro etapas básicas: detección, identificación, decisión y respuesta, siendo el tiempo transcurrido entre la detección y la respuesta el parámetro que define el nivel de seguridad vial activa. El conductor necesita que las marcas viales sean visibles e identificables a una distancia determinada de seguridad durante el día y la noche. Estas condiciones deben cumplirse bajo cualquier condición climática, sin comprometer las propiedades antideslizantes de la superficie. Por ello es que deben diseñarse, aplicarse y ser mantenidas correctamente (Calavia, 2013).

2.2. Recubrimientos retrorreflectantes

Existe una gran diversidad de materiales y combinaciones posibles para obtener un Sistema de Señalamiento Vial Horizontal. En el marco del desarrollo de la tesis, el estudio se centra en las pinturas base acuosa debido a que no presentan disolventes en su composición, por lo que son más amigables con el medio ambiente y, en la actualidad, presentan un creciente desarrollo.

La siguiente sección, detalla una breve introducción de las principales características de los materiales base, es decir: pinturas, termoplásticos y plásticos en frío, existentes en el mercado. Con respecto a los materiales de post mezclado, se aborda el estudio de las microesferas de vidrio. Los materiales antideslizantes quedan fuera del alcance de la tesis.

2.2.1. Pinturas

Las pinturas se clasifican según su proceso de secado en: de secado físico y de secado fisicoquímico.

Pinturas de secado físico

Acrílicas base solvente: Las pinturas contemporáneas a base solvente contienen resinas acrílicas (acrílicas puras o en combinación con otros polímeros de distinta naturaleza como el estireno) que se disuelven en solventes orgánicos. En los países donde todavía está permitido, se utilizan los solventes aromáticos como ésteres o cetonas a pesar de su peligrosidad para el medio ambiente y la salud humana por su menor precio, mejor control de secado y, en general, mejor adherencia a superficies asfálticas. Luego de la aplicación en espesores de película húmeda, no mayores a 600 µm, la evaporación del solvente genera la solidificación del polímero y, así, la película se forma por un fenómeno físico. El solvente es útil para que la pintura sea líquida y luego, por evaporación escapa a la atmósfera como Compuesto Orgánico Volátil (COV) (Babic et al., 2015).

La principal característica que presentan son su rápido secado y endurecimiento en profundidad, alta persistencia y retención del color, además de poseer buena resistencia a la radiación UV y versatilidad de aplicación. En el caso de las pinturas acrílicas puras, presentan un buen comportamiento sobre pavimentos bituminosos sin riesgo de “sangrado”, pero en cambio, son sensibles a grasas, aceites y disolventes orgánicos, así como son ligeramente sensibles a elevadas temperaturas y al manchado ocasionado por los neumáticos de los vehículos (Moreira et al., 2003).

Emulsiones acuosas: el ligante utilizado es un polímero acrílico, cuyas partículas son de menor tamaño que una micra y están emulsionadas en agua en presencia de sustancias tensoactivas y coalescentes que favorecen la formación de la película cuando el agua se evapora. Es decir, que el mecanismo de formación de la película se produce por coalescencia. Para comprender este fenómeno es necesario aclarar que cada polímero en emulsión precisa de una temperatura determinada, denominada Temperatura

Mínima de Formación de *Film* (TMFF), para formar una película uniforme y homogénea. En la Figura 2-1 se presenta el mecanismo de formación del *film* de un polímero en emulsión a la temperatura correcta (superior a la mencionada TMFF) dividido en cuatro etapas. La primera imagen (Figura 2-1 A) corresponde al momento de la aplicación de la emulsión que contiene el agua en su totalidad y las partículas de polímero se mueven libremente en su seno. Luego, conforme se evapora el agua (Figura 2-1 B), las partículas de polímero se acercan unas a otras y; a medida que el agua se continúa evaporando, se deforman (Figura 2-1 C). Finalmente, las partículas se unen de manera progresiva formando una película (Figura 2-1 D) (Cruz Alcalde, 2014).

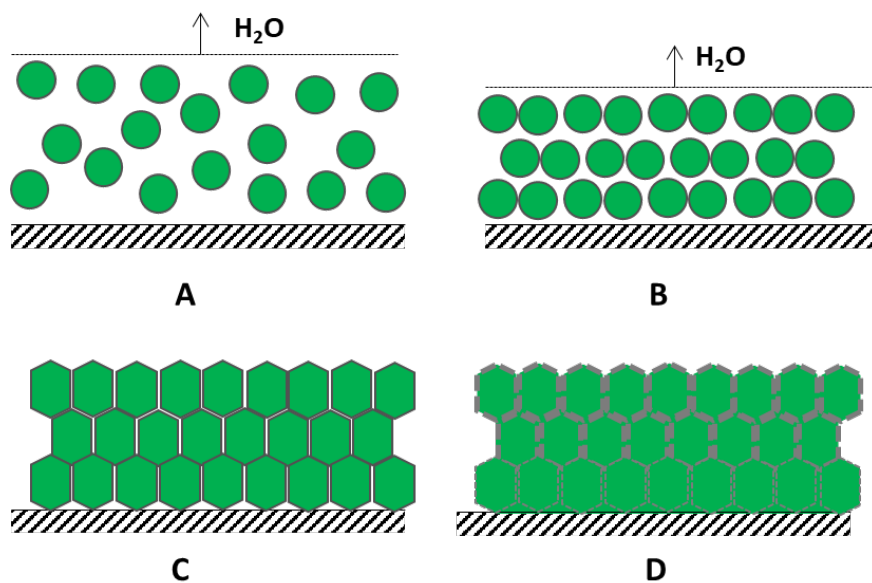


Figura 2-1. Fenómeno de secado por coalescencia

Fuente: Cruz Alcalde, 2014 (adaptación propia)

En este tipo de pinturas, es frecuente la formación de grietas en las películas debido a que durante el secado de éstas (mediante el mencionado fenómeno de coalescencia) se generan tensiones en forma espontánea de diferente magnitud. Estas últimas dependen de las variables de formulación, de las materias primas utilizadas y de la forma de elaboración de las pinturas (eficiencia de la dispersión) (Giudice, 2009).

Es importante destacar la resistencia al lavado, propiedad casi exclusiva de este tipo de pinturas. En general, el tiempo que tarda en alcanzar la misma, es mayor al tiempo de secado y dependen en gran medida del aglutinante, los aditivos utilizados y de las condiciones climáticas. Ésta es una propiedad crítica cuando hay riesgo de lluvia. El tiempo de secado es considerablemente mayor que el tiempo de las pinturas con disolventes orgánicos y se encuentra sujeto a las condiciones climáticas. Durante los

primeros días de su aplicación, la resistencia al desgaste es muy baja debido a que tarda en adquirir la dureza necesaria, por ello no es aconsejable su aplicación en zonas en las que se deba circular antes de tal periodo de tiempo (Babic et al. 2015).

Se aplican muy fácilmente y, una vez que han adquirido la dureza final, poseen buenas propiedades mecánicas y de retención de color. No producen efectos de sangrado sobre pavimentos bituminosos y pueden usarse directamente sobre pavimentos de hormigón (Ministerio de Fomento, 2012).

Pinturas de secado fisicoquímico

Las pinturas de secado fisicoquímico secan mediante dos procesos: la evaporación del disolvente y la polimerización del ligante que comienza en el momento de aplicación. El primero de ellos es similar al caso de las pinturas de secado físico, mientras que el segundo, provoca la formación de cadenas macromoleculares de ligante por un proceso reactivo que tiene lugar en presencia de otro componente (endurecedor), o con el oxígeno del aire en presencia de catalizadores (secantes) como es el caso de las resinas alquídicas. En estos casos, la película solo adquiere su dureza final una vez que se ha completado este segundo proceso, luego de un tiempo, cuya duración depende de la naturaleza del ligante y del tipo de reacción de polimerización, y puede oscilar entre unos minutos a varios días. De este tipo, podemos nombrar:

Pinturas alquídicas: el ligante es un producto que se obtiene por la reacción entre un alcohol polihidroxílico (como la glicerina o el pentaeritritol) y un ácido policarboxílico (como el anhídrido ftálico), combinados con ácidos de aceites secantes o semisecantes, los cuales se unen a las moléculas de resinas por esterificación durante la fabricación del compuesto para convertirse en parte integrante del polímero, proporcionándole flexibilidad y capacidad de adherencia.

En condiciones climáticas normales y temperaturas entre 15 °C y 25 °C, la película alcanza una dureza suficiente en poco más de una hora para su uso en líneas longitudinales de vías interurbanas. Aunque su resistencia al desgaste es baja, aspecto que no la hace aconsejable en zonas urbanas. Una vez que ha curado completamente, tiene excelente resistencia al desgaste y a los agentes químicos, muy superior a las pinturas acrílicas, como así también una muy buena retención de las microesferas de vidrio (Ministerio de Fomento, 2012).

Emulsiones acuosas autorreticulables de secado rápido: el ligante está formado por monómeros acrílicos emulsionados en un medio acuoso fuertemente alcalino, en la cual la presencia de otras sustancias provoca la formación de un polímero complejo cuando se reduce la alcalinidad por evaporación del amoníaco presente. La transformación de los monómeros en emulsión en un *film* polimérico se produce por una reacción que consume parte del agua rápidamente, incluso en condiciones ambientales desfavorables o alta humedad relativa.

En condiciones ambientales favorables pueden alcanzarse tiempos de secado de dos o tres minutos, por lo que su puesta en servicio se puede producir casi de inmediato y poseen excelentes propiedades de retención del color, buena resistencia a la intemperie, afinidad con las microesferas de vidrio y pueden aplicarse directamente sobre hormigón (Coves García, 2016).

2.2.2. Termoplásticos

Se trata de una mezcla compuesta por sustancias minerales de granulometría gruesa (hasta 700 micras), una resina y un plastificante (ambos en forma sólida granular o en escamas) con microesferas de vidrio premezcladas. Se utiliza un aceite mineral especial, que ayuda a controlar la viscosidad de aplicación y plastificar el conjunto, y un pigmento que le da color. En Argentina se aplican estos materiales para demarcación horizontal desde mediados de la década de los '60.

Es importante aclarar que el hablar de termoplástico en el ámbito de la “señalización vial” tiene un significado diferente al contexto que se estudia en la química de los polímeros. En el caso de la demarcación vial su nombre hace referencia a que requiere energía térmica para su procesamiento. Los materiales termoplásticos carecen de disolventes, el calor fluidifica el producto (se calientan a temperaturas entre 180 °C y 220 °C que varían dependiendo del producto) permitiendo así su aplicación. Una vez aplicado el producto sobre el pavimento se vuelve sólido de manera inmediata, permitiendo la apertura al tránsito en poco tiempo. Las resinas, según el caso, provienen de plantaciones de pinos o de destilados del petróleo, pero la necesidad de calentarlos dos veces (fabricación y aplicación) aumenta significativamente el impacto ambiental (Babic et al., 2015). Es fundamental el control de la temperatura de fusión y aplicación debido a que un sobrecalentamiento en la caldera produce separación de los componentes y alteración de las propiedades de la resina que, en consecuencia, provoca marcas de escasa duración. Por otra parte, la insuficiente temperatura de fusión

genera una falta de homogeneidad que provoca una mala adherencia del material al pavimento.

En cuanto a la clasificación de estos materiales, tanto desde el punto de vista de sus constituyentes como de su comportamiento de uso, no hay diferencias significativas entre los distintos productos para clasificarlos por estos criterios. Por ello, se pueden clasificar, atendiendo el método de aplicación, en materiales aplicados por pulverización (*Sprayplásticos*) o por extrusión.

En el caso de los materiales aplicados por pulverización (*Sprayplásticos*), Figura 2-2, la masa del material es previamente calentada de 180 °C a 220 °C y se aplica pulverizada como pintura líquida con pistolas especiales. Al mismo tiempo se proyectan a presión las microesferas de vidrio que deben penetrar adecuadamente. Se obtiene un espesor de película que puede estar comprendido entre 1,2 mm y 1,7 mm.



Figura 2-2. Máquinas de aplicación de Termoplástico por Pulverización

Fuente: Ministerio de Fomento, 2012

Los termoplásticos aplicados por extrusión, Figura 2-3, se aplican sin presión, por “colada” o mediante dispositivos que colocan el material sobre el pavimento, en la forma y dimensiones deseadas una vez alcanzada la temperatura de aplicación. Ésta suele ser ligeramente menor que en el caso de la aplicación por pulverización. Se utilizan dispositivos en forma de caja que se arrastran sobre el pavimento, con una abertura en su parte posterior por donde sale el material de forma controlada, formando una línea uniforme, de geometría precisa, con un espesor de película que puede alcanzar los 3 mm y 4 mm (Ministerio De Fomento, 2012).



Figura 2-3. Máquinas de aplicación de Termoplástico por Extrusión

Fuente: Ministerio de Fomento, 2012

2.2.3. Plásticos en frío

Los plásticos en frío consisten en un sistema de dos componentes en el cual los monómeros se mezclan con pigmentos y rellenos, polimerizándose en la superficie del pavimento para formar la marca mediante el agregado de un iniciador de la reacción.

Sus constituyentes son los mismos que en los otros productos, con las particularidades de aplicación que cada una de las formas requieren. La resina base más utilizada es el metacrilato de metilo, que se utiliza disuelto en su monómero acrílico, el cual se polimeriza por la acción de un iniciador (peróxido de benzoilo). También, principalmente en los materiales de aplicación manual, se emplean mezclas de resinas metacrilato y poliésteres.

El material se entrega listo para su uso, sólo es necesario mezclar los componentes hasta conseguir una perfecta homogeneidad y aplicar el producto antes de sobrepasar el tiempo de vida útil (variable dependiendo de la mezcla de los productos y de la temperatura), ya que endurece. Deben seguirse las instrucciones respecto a las proporciones de mezcla de los componentes, porque una alteración importante puede reducir notablemente su durabilidad (Ministerio de Fomento, 2012).

Según Babic et al. (2015), si bien estos productos tienen un impacto ambiental mínimo en el momento de la aplicación y tienen excelentes propiedades, requieren una alta

precisión en la dosificación, equipo especializado y, por la sensibilidad a la humedad y la temperatura se necesitan formulaciones especiales. Uno de los principales riesgos que presenta este tipo de pinturas son los monómeros, que son inflamables y pueden sufrir una polimerización incontrolada. Esto requiere un transporte especial y, además, que el iniciador esté claramente identificado. Son adecuados para todo tipo de pavimentos, pero su adherencia es mejor sobre los pavimentos asfálticos. Se clasifican los productos de acuerdo con el método de aplicación en plásticos en frío, de aplicación a máquina Figura 2-4 y de aplicación manual, Figura 2-5.

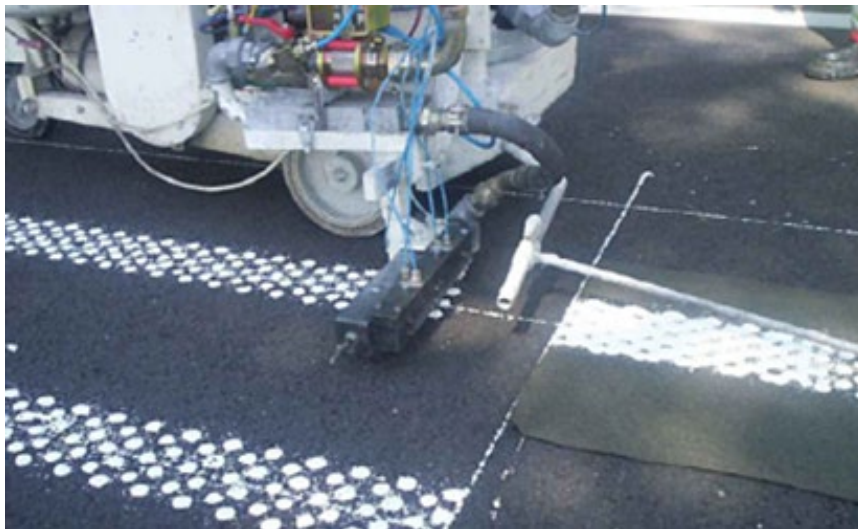


Figura 2-4. Aplicación con máquina a botones de Plástico en Frío

Fuente: Ministerio de Fomento, 2012



Figura 2-5 Aplicación Manual de Plástico en Frío

Fuente: <https://www.cristacol.com.ar>

2.2.4. Microesferas de vidrio

Las microesferas de vidrio son partículas de vidrio transparente y esféricas que, mediante la retrorreflexión de los haces de luz incidentes de los faros de un vehículo hacia su conductor, proporcionan visibilidad nocturna a las marcas viales. En este ámbito se usan dos tipos: una incorporada en la pintura (Microesferas Premezcladas) y la otra sembrada sobre la superficie (Microesferas Sembradas o *Drop on*).

Por la importancia de su función en la visibilidad nocturna, las normativas sobre señalización caracterizan estos materiales limitando su granulometría, el porcentaje de unidades defectuosas admisible, su índice de refracción, su resistencia a sales y otros agentes químicos. En el caso de las microesferas sembradas, se especifica además la cantidad por metro cuadrado que debe añadirse sobre la marca vial para asegurar un nivel mínimo de retrorreflexión. La granulometría elegida debe ser adecuada al espesor de la película del producto sobre el cual se aplican, ya que si son demasiado gruesas son arrancadas de la superficie rápidamente por las ruedas de los vehículos, mientras que las finas se hunden en la película, sin que tengan un efecto inmediato en la visibilidad. Las propiedades, de las que depende el grado de hundimiento de las microesferas, pueden mejorarse mediante la aplicación de tratamientos superficiales (Ministerio de Fomento, 2012).

Existen 3 tipos de microesferas utilizadas en este ámbito detalladas a continuación:

- *Intermix*: son las que se incorporan a la masa termoplástica durante la fabricación de modo de permanecer internas a la película aplicada. Permiten la retrorreflexión sólo después del desgaste de la superficie, cuando las microesferas de vidrio quedan expuestas.
- *Premix*: son incorporadas en la pintura antes de su aplicación, de modo que permanecen internas en la película aplicada. Las mismas quedan expuestas luego del desgaste de la superficie permitiendo la retrorreflexión.
- *Drop On*: son aplicadas por aspersión junto con la pintura o termoplástico. Por este motivo, permanecen en la superficie de la película aplicada brindando una inmediata retrorreflexión de la demarcación.

Cada tipo de microesferas tiene un uso diferente, dependiendo de su tamaño y/o gravedad específica (Moreira et al., 2003). Las microesferas tipo *drop on* pueden ser Tipo I, Tipo III y Tipo IV. Las Tipo I y Tipo III son adecuadas para cualquier tipo de

material, pero las Tipo IV, debido a su tamaño superior, tienen que ir combinadas con un material base más grueso que permita el embebido de la microesfera. A continuación, se exponen las principales características de cada tipo mencionado.

Tipo I: son fabricadas de vidrio reciclado y se utilizan en carreteras. Tienen un índice de refracción de 1,5.

Tipo III: son fabricadas por materia prima virgen y poseen un índice de refracción de 1,9.

Tipo IV: son fabricadas de vidrio reciclado o directamente por fusión en caliente. Estas son de mayor tamaño y están autorizadas para uso en la industria de los aeropuertos.

Además, las microesferas pueden tener tratamientos superficiales que consideran las características de los materiales a los que van destinadas. De esta forma, es posible controlar el grado de “hundimiento” o “flotación” en la película del material utilizado con la finalidad de evitar su rápido desprendimiento. También se realizan tratamientos superficiales para incrementar la adherencia. En este sentido, se precisa un tratamiento con un producto de naturaleza compatible con la resina del material de señalización. Con gran frecuencia, ambos tratamientos de adherencia y flotación están presentes al mismo tiempo, haciendo al sistema más eficaz en la mayoría de los casos (Ministerio De Fomento, 2012).

Los tratamientos que se pueden realizar a las microesferas de vidrio, en la actualidad, se resumen a continuación:

- Tratamiento de hidrofugación: se aplica para evitar que absorban la humedad del aire.
- Tratamiento de flotación: se aplica principalmente para permitir que las microesferas floten cuando se colocan sobre materiales de señalización vial horizontal en fase líquida.
- Tratamiento de adherencia: se aplica para permitir una mayor adherencia entre las microesferas y el ligante.

Los tratamientos mencionados se realizan en consideración del material base. Se obtienen así las microesferas con tratamientos superficiales denominadas de las siguientes formas:

- TAF: Adherencia y Flotación para pinturas base solvente.
- WBP: Adherencia y Flotación para pinturas base acuosa.
- TRM: Adherencia para termoplásticos.
- BCP: Adherencia y Flotación para pinturas de dos componentes.

La Norma IRAM 1225/2014, clasifica las microesferas de acuerdo con la granulometría y según sean de premezcla las denomina: tipo P1, P2, P3 y, en el caso de las de sembrado como: tipo S1, S2, S3, S4 y S5 estableciéndose las curvas granulométricas límites.

2.3. Propiedades de las marcas viales

Para que la señalización horizontal cumpla su función, se requiere que tenga ciertas cualidades o características que se manifiesten por encima de valores mínimos o nivel umbral de servicio, que sean perceptibles en cualquier condición de iluminación y que se mantengan durante el mayor tiempo posible. Este nivel umbral de servicio de las marcas viales debe ser establecido atendiendo a las necesidades de los conductores y a los requerimientos del tránsito. Para ello, se requiere:

1. Definir las características que se consideran esenciales para que la señalización cumpla la función para la que está destinada, desde el punto de vista del usuario (Global and Chinese Road Marking Resins, 2015 citado por Garcia Coves, 2016).
2. Establecer el valor mínimo de estas características, según las circunstancias de uso o la finalidad que se pretenda, (Daniel et al., 2015 citado por García Coves, 2015).
3. Determinar el método para cuantificar el valor de estas características, de la forma más simple y objetiva posible (Federal Highway Administration (FHWA), 2010 citado por Garcia Coves, 2016).

Para asegurar la adecuada calidad de la señalización horizontal, es necesario hacer una selección de los materiales a emplear. Para ello, deben tenerse en cuenta criterios de diversa naturaleza, ya sea económicos, medioambientales, de aplicación, de localización, etc., pero sobre todo debe atender a sus cualidades específicas y de adecuación de uso (Cao Yong, 2004). Como se menciona en el Capítulo 1, las principales características esperadas en la demarcación horizontal van a depender del entorno donde están aplicadas.

La necesidad de los usuarios respecto a la demarcación horizontal se puede interpretar como la de obtener información visual de la carretera a través de mensajes visibles e identificables y a una distancia tal que el conductor tenga suficiente tiempo de percepción y reacción (Ministerio de Fomento, 2012). De esta forma, el conductor recibe la información visual

proveniente de la marca vial de forma continua. Por ello, interesa conocer las propiedades que satisfacen dichas necesidades. De esta forma, podemos mencionar:

- **Diseño:** es la combinación de formas y colores que proporcionan un mensaje discernible (asegurando el contraste de la marca vial con el pavimento adyacente tanto de día como de noche) e identificable (mediante la utilización de códigos de formas y colores normalizados). En Argentina se utiliza el Manual de señalamiento Horizontal de la Dirección Nacional de Vialidad, aprobado por resolución 2501/2012 (DNV, 2012).
- **Distancia de visibilidad:** depende de la marca vial y de factores relacionados a la carretera (trazado, iluminación, luminancia del pavimento y climatología), el vehículo (ángulos de iluminación y de observación, así como la propia intensidad y limpieza de los faros) y el conductor que interactúa. Dicha distancia se obtiene fijando los valores mínimos de los parámetros fotométricos propios de la marca vial (retroreflexión, luminancia y color) y los de su diseño (forma y superficie específica).
- **Resistencia al deslizamiento.**

La normativa europea denomina requisitos esenciales de las marcas viales a sus características de visibilidad (diurna y nocturna), de resistencia al deslizamiento y de durabilidad; siendo características propias de cada sistema de señalamiento horizontal.

Si bien en los siguientes puntos se explican las características de visibilidad y resistencia al deslizamiento, el fenómeno de durabilidad es abordado a lo largo de la tesis mediante el análisis de los factores que la afectan y los ensayos disponibles e implementados en el estudio.

2.3.1. Visibilidad

La demarcación horizontal debe garantizar la visibilidad necesaria para que el conductor pueda circular con seguridad por la carretera. Para que esto se cumpla, el conductor debe distinguirla de forma clara, con anticipación, para tomar la decisión correcta. Existen varios criterios para evaluar la visibilidad de la señalización vial. Schwab (1999) plantea dos criterios: por un lado, aspectos “no cuantificables” como la visibilidad y legibilidad y; por el otro, “cuantificables” como el contraste y coeficiente de luminancia retroreflejada. De estos últimos, el contraste define la visibilidad diurna o en ambientes iluminados y el coeficiente de luminancia retroreflejada (retroreflectividad) define la visibilidad en lugares sin iluminación. La visibilidad nocturna se debe tratar con especial interés, debido a que no existen otros elementos de referencia sobre la carretera que puedan proporcionar información previa. La

visibilidad en situaciones de iluminación diurna o iluminación pública no puede considerarse crítica, debido a la gran cantidad de elementos que rodean la carretera que actúan de delineadores no intencionados, pero que proporcionan gran cantidad de información previa. En consecuencia, para ser eficaces, los requisitos sobre la visibilidad de las marcas viales deben basarse en las situaciones más críticas, como son las rutas sin iluminación pública, cuya única fuente de información previa son las marcas viales (Calavia, 1995).

2.3.1.1. Visibilidad diurna

La medición de la visibilidad diurna de una demarcación está especificada en las normas UNE EN 1436/2009 y ASTM E2302/16, que definen el *coeficiente de luminancia bajo iluminación difusa*, Q_d . El mismo reproduce de forma adecuada las condiciones de visibilidad que un conductor tiene de las marcas viales en condiciones de iluminación diurna o alumbrado público. Este coeficiente se calcula como el cociente entre la luminancia en una zona de marca vial en una dirección dada y la luminancia en esa zona y, se expresa en milicandelas por metro cuadrado y por lux ($\text{mcd.lx}^{-1}.\text{m}^{-2}$). El valor se obtiene de una zona de la marca vial a partir de la ecuación 2-1 (Ministerio de Fomento, 2012).

$$Q_d = \frac{L}{E} \quad (2-1)$$

Donde:

- Q_d = Coeficiente de luminancia bajo iluminación difusa ($\text{mcd.lx}^{-1}.\text{m}^{-2}$)
- L = Luminancia de la zona bajo iluminación difusa (mcd.m^{-2})
- E = Luminancia sobre el plano horizontal de la zona (lx)

En la Figura 2-6 se presentan las condiciones de medida establecidas para la obtención de Q_d según la normativa europea que considera un ángulo de observación de $2,29^\circ$ y un iluminante patrón D65, como se define en la norma ISO/CIE 10526, alumbrando la zona de medida (Ministerio de Fomento, 2012).

Estas condiciones de medición simulan una distancia del observador a 30 m para el conductor cuyos ojos se encuentran a una altura de 1,20 m por encima de la calzada.

El valor máximo alcanzado por una superficie reflectante difusa de blancura perfecta es de $318 \text{ mcd.lx}^{-1}.\text{m}^{-2}$.

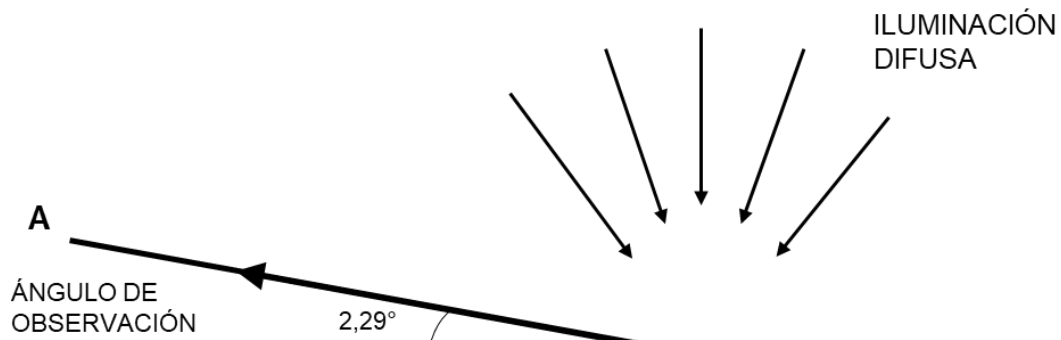


Figura 2-6. Condiciones de medida del coeficiente de luminancia bajo iluminación difusa

Fuente: Calavia, 1995 (adaptación propia)

Como se menciona anteriormente, la visibilidad de las marcas viales depende del contraste con el pavimento adyacente, debido a que siempre están colocadas sobre éste. Por ello el iluminante es el mismo en ambas superficies. La relación de contraste se define como indica la ecuación 2-2.

$$R_C = \frac{L_M - L_P}{L_P} \quad (2-2)$$

Donde:

- R_C = Relación de contraste
- L_M = Luminancia de la marca vial
- L_P = Luminancia del pavimento adyacente

Cuando los pavimentos son de color muy claro (por ejemplo, en pavimentos de Hormigón), se recomienda hacer un rebordeo con un color que aumente el contraste con el pavimento. Como referencia en España, el Pliego de prescripciones técnicas y generales para obras de carreteras y puentes PG-3 (Ministerio de Fomento, 2015) especifica rebordear de negro cuando el factor de luminancia del pavimento es superior a 0,15; lo cual especifica indirectamente una relación de contraste mínima (R_C) de 1,7 (es decir, que la marca vial es un 70% más visible que el pavimento). En Argentina, el Manual de Señalamiento Horizontal (DNV, 2012) determina las geometrías que deben cumplir las líneas de borde en el caso de pavimentos claros (hormigón). En la Figura 2-7 se presentan imágenes que ejemplifican lo mencionado. En ambas imágenes se observa que en las las líneas de borde se ejecuta una línea interna color negro, con material acrílico, de 5 cm de ancho contigua a la línea de borde de calzada. Además, en el eje, se realiza un bastón color negro de 300 cm de longitud y del mismo ancho que el bastón blanco, antes de cada bastón blanco considerando el sentido del tránsito.



Figura 2-7. Ejemplos de Contraste en pavimentos de hormigón

Fuente: Manual de Señalamiento Horizontal DNV, 2012

2.3.1.2. Visibilidad nocturna – Retroreflexión

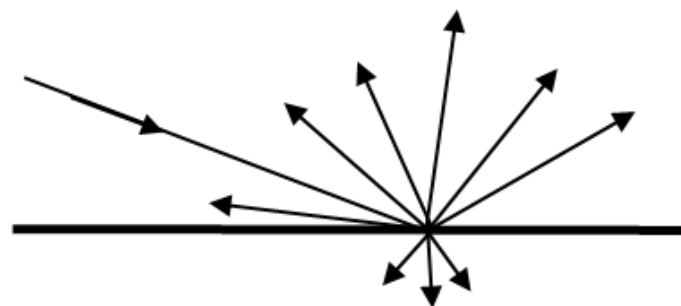
La visibilidad nocturna tiene lugar cuando la iluminación de la marca vial se realiza desde los faros del vehículo. En las noches, los únicos medios de comunicación entre el conductor y la carretera son las pinturas de demarcación horizontal y las señales verticales. Lee y Donnell (2007) observaron significativos cambios en el comportamiento de los conductores durante la noche en comparación con el día debido a las diferencias en el campo de visión que experimenta el conductor.

Para profundizar en la temática, Schwab (1999) explica que la reflexión es un fenómeno natural de la luz y los objetos iluminados, y ocurre cuando un cuerpo o material refleja parte de la luz emitida por una fuente. Los distintos tipos de reflexión se presentan en la Figura 2.8, y se definen a continuación:

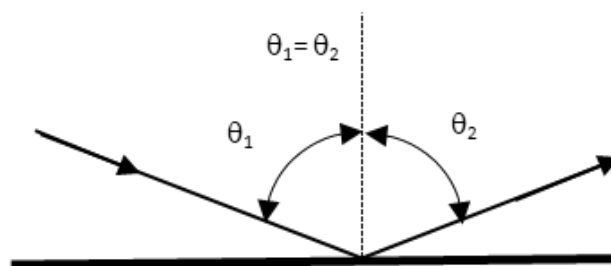
- Reflexión difusa: la reflexión difusa ocurre cuando la luz del faro incide sobre una superficie rugosa y los rayos de luz se reflejan en varias direcciones. En general, la señalización sin la adición de microesferas provoca este fenómeno. En este tipo de reflexión, escasa parte de la luz regresa a la fuente emisora.
- Reflexión especular: la reflexión especular ocurre cuando la luz incide sobre la superficie y se refleja en la dirección opuesta (el haz reflejado predominante tiene el

mismo ángulo de reflexión que el haz incidente, respecto a la normal), y no hacia el conductor. Este tipo de fenómeno se puede observar fácilmente cuando una película de agua cubre las señales de tránsito en el pavimento y la luz del faro brilla, provocando un efecto de espejo (especular).

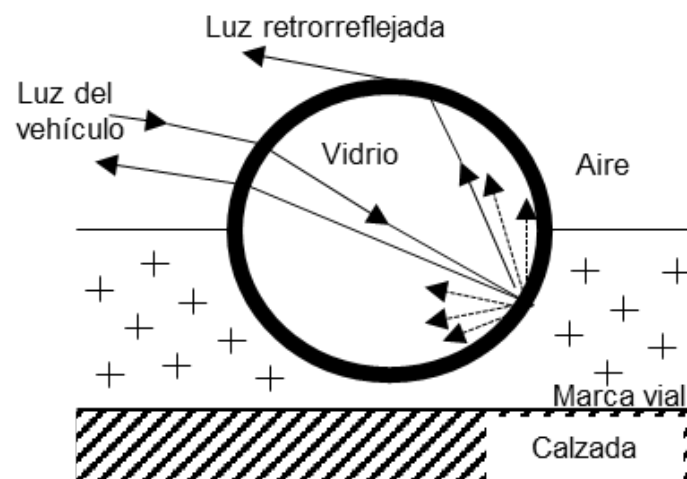
- **Retroreflexión:** La retroreflexión se produce cuando la luz de los faros del vehículo incide sobre las marcas viales en el pavimento y se dirige a su fuente, haciendo que este material sea visible por la noche.



Reflexión difusa: calzada seca y rugosa



Reflexión especular: calzada mojada



Fenómeno de Retroreflexión en una esfera de vidrio

Figura 2-8. Fenómeno de retroreflexión en una microesfera de vidrio

Fuente: Calavia, 1995 (adaptación propia)

En consecuencia, el fenómeno de retrorreflexión sugiere niveles de seguridad vial mayores que otros fenómenos que no lo contemplan. Por ello, el nivel de visibilidad se mide a través de la retrorreflexión ofrecida por el sistema de demarcación vial utilizado. La retrorreflexión se garantiza con el uso de las microesferas de vidrio que se añaden durante el proceso de pintado y permiten este fenómeno debido a que la luz procedente de los faros de un vehículo, se refracta por la microesfera y gran parte del haz se refleja por la superficie hundida de la esfera, y retorna en la misma dirección de incidencia, Figura 2-9.

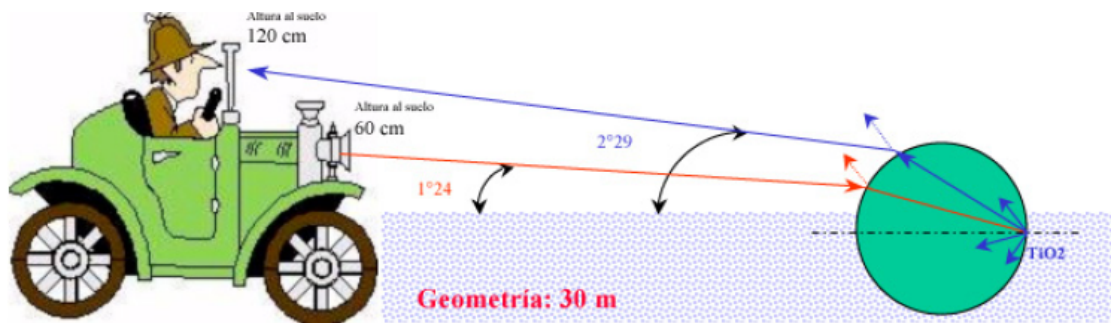


Figura 2-9. Fenómeno de retrorreflexión y geometría de medida

Fuente: Ministerio de fomento, 2012

Moreira y Menegon (2003) explican que los pigmentos activos presentes en la pintura son los que aseguran el reflejo del haz de luz de las microesferas que se encuentran ancladas (parcialmente sumergidas) en la pintura. Además, destacan que la máxima retrorreflectividad ocurre cuando la microesfera está anclada el 60% de su diámetro aproximadamente.

La retrorreflexión bajo iluminación de los faros de un vehículo se mide determinando el coeficiente de luminancia retrorreflejada " R_L " expresada en $(mcd \cdot lx^{-1} \cdot m^{-2})$. La norma ASTM - E1710 (ASTM 2011) define el coeficiente de luminancia retrorreflejada como la relación entre la luminancia de una superficie retrorreflectante en la dirección de observación y la luminancia recibida en un plano perpendicular en la dirección de la luz incidente. Este resultado varía según la distancia entre el vehículo y el punto de señalización observado. Cuanto mayor sea la distancia, menor será este valor de luminancia.

El " R_L " de una zona de marca vial se obtiene a partir de la ecuación 2-3.

$$R_L = \frac{L}{E} \tag{2-3}$$

Donde:

- R_L = Coeficiente de luminancia retrorreflejada o retrorreflexión ($\text{mcd.lx}^{-1}.\text{m}^{-2}$).
- E = iluminancia creada por la fuente luminosa sobre la zona en un plano perpendicular a la dirección de iluminación (lx).
- L = luminancia de la zona que está sometida a la iluminación producida por una sola fuente luminosa de una apertura angular relativamente pequeña proveniente del mismo lugar en el que se mide la luminancia (mcd.m^{-2}).

Para medir la retrorreflexión existen distintos equipos que simulan las condiciones a las que el conductor visualiza la demarcación vial en la noche. Antes de profundizar en este aspecto, es necesario comentar las consideraciones que se tienen en las geometrías de medida. Como se puede observar en la Figura 2-9, existe un ángulo en el que las marcas viales son iluminadas por el vehículo y un ángulo de observación, que corresponde a la visual del usuario. La CIE presenta definiciones de los términos utilizados en el campo de la reflexión de la luz. La Figura 2-10 ilustra tales condiciones según las configuraciones de ángulos que un vehículo manifiesta sobre la pintura de demarcación vial: (A) ángulo de incidencia (α) definido como el ángulo entre el eje de iluminación y el eje retrorreflector; (B) ángulo de observación (β) caracterizado por el ángulo formado por los ejes de los rayos incidentes y los rayos reflejados y; (C) ángulo de iluminación (c) que corresponde al ángulo formado entre el eje de iluminación y la superficie reflejada (Moreira y Menegon, 2003).

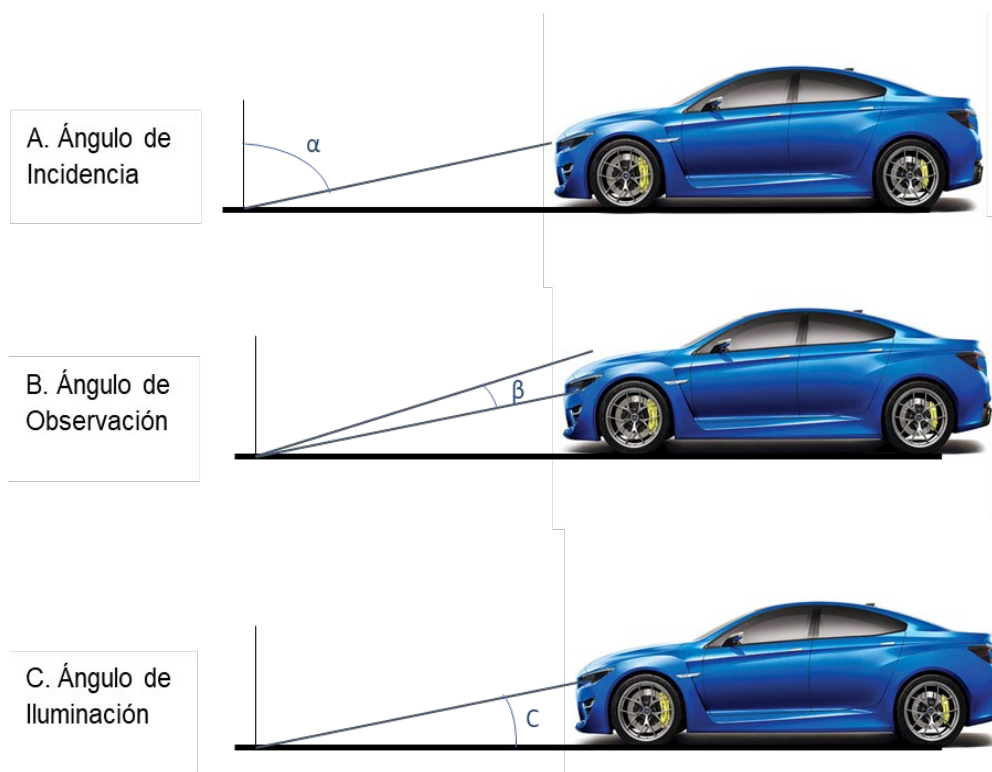


Figura 2-10. Configuración de los ángulos según CIE utilizados en el campo de la reflexión de la luz. Fuente: Moreira y Menegon, 2003 (adaptación propia)

Según la posición del elemento reflector, se encuentre situado a 15 o 30 metros, los ángulos de observación generados determinan la geometría del equipo “de 15 metros” o “de 30 metros”. En diversas normativas se referencia la retrorreflexión a 30 metros, entre ellas podemos nombrar la norma ASTM E 1710/18 y la norma UNE EN 1436/09 que, si bien no lo explicita como retrorreflexión a 30 m, establece los ángulos correspondientes a dicha geometría. La Figura 2-11 presenta la configuración de ángulos correspondiente a la geometría a 15 metros y la Figura 2-12 muestra la configuración de la geometría a 30 metros.



Figura 2-11 Geometría a 15 metros según CIE Fuente: Moreira y Menegon, 2003 (adaptación propia)



Figura 2-12. Geometría a 30 metros según CIE Fuente: Moreira y Menegon, 2003 (adaptación propia)

Para la medición de la retrorreflexión se utilizan equipos conocidos como retrorreflectómetros. Estos dispositivos emiten luz sobre la demarcación del pavimento con un cierto ángulo de incidencia y capturan la cantidad de esta luz que retorna en una cámara cerrada, midiendo el coeficiente de luminancia retrorreflejada (R_L). Los equipos también se diferencian por su geometría de medida (“a 15 m” o “a 30 m”) y pueden ser portátiles como presenta la Figura 2-13 o dinámicos de acuerdo con la Figura 2-14. El equipo portátil tiene la facilidad de transporte, almacenamiento de datos y lecturas rápidas. Algunas marcas proporcionan equipos con tecnología LED en su sistema óptico, lo que hace que el equipo sea más seguro para el mantenimiento, sin embargo, se debe tener cuidado en cuanto a la ubicación de recolección y seguridad del operador mientras utiliza el equipo en la vía. Los equipos dinámicos, son retrorreflectómetros que se acoplan a vehículos, con un sistema de localización, adquisición de datos y emisión

que permite la generación de una superficie luminosa y un sistema de recepción de flujo luminoso.



Figura 2-13. Retroreflectómetro portátil

Fuente: producción propia

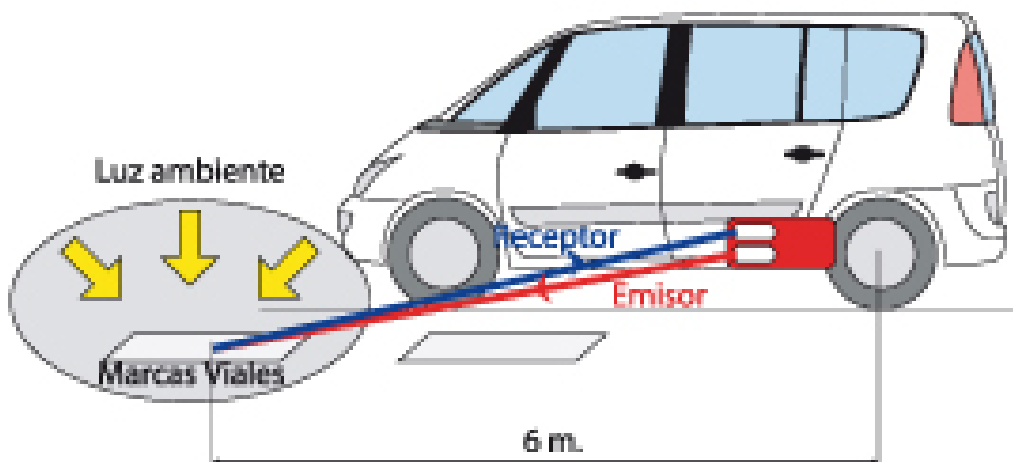


Figura 2-14. Retrorreflectómetro dinámico

Fuente: <http://www.euroconsultnt.es>

A continuación, en la Tabla 2-1 se describen las distintas geometrías correspondientes a tres grupos fundamentales de equipos portátiles y, el ECODYN que permite obtener datos de visibilidad diurna y nocturna con un rendimiento de entre 300 y 600 km diarios de líneas.

Tabla 2-1. Ángulo de los equipos disponibles en el mercado
 Fuente: Calavia, 1995; Moreira y Menegon, 2003 (adaptación propia)

Equipo	Angulo de iluminación (c)	Ángulo de Observación (β)	Angulo de incidencia (α)	Observaciones
LAZERLUX (equipo móvil)	1,5°	1,0°	88,50°	
Mirolux - 30	1,24°	1,05°	88,76°	Nueva geometría CEN
Ecolux, Mirolux-15, Retrolux	3,5°	1,0°	86,50°	Empleada en Francia, EEUU y Argentina)
ECODYNE	3,5°	1,0°	86,50°	
Optronik	3,5°	1,5°	86,50°	Geometría utilizada en Alemania y España

Con base en los ángulos de iluminación y observación, se establecen valores mínimos de retrorreflexión que debe cumplir la demarcación vial horizontal, para ser visible durante la noche.

Muchos autores coinciden que el valor mínimo de retrorreflexión representa la condición de terminación de un material de señalización vial. En 1992, el Congreso de los EE. UU. requirió que el Manual de dispositivos de control de tráfico uniforme (MUTCD) estableciera requisitos mínimos para la retrorreflexión de las marcas en el pavimento de las carreteras. Se han realizado varios estudios sobre la temática y, en el año 2004 la Administración Federal de Carreteras (FHWA) desarrolló pautas para determinar la retrorreflexión mínima. La FHWA patrocinó evaluaciones de campo para desarrollar requisitos mínimos de retrorreflexión para las marcas viales. Zwahlen y Schnell (2000) también llevaron a cabo un estudio utilizando un evaluador de visibilidad de marcas viales, asistido por computadora para determinar la retrorreflexión requerida para respaldar el desempeño del conductor. Gran variedad de factores como el color de la marca, la edad y la agudeza visual del conductor y, la velocidad de viaje son determinantes del nivel de retrorreflexión mínimo aceptable de manera subjetiva.

Según Fish (1996) muchos investigadores parecen estar de acuerdo en que un nivel mínimo aceptable de retrorreflexión es de alrededor de 100 a 120 mcd.lx⁻¹.m². En la actualidad no se llegó a un consenso, a nivel internacional, sobre los niveles adecuados de retrorreflectividad que debe tener una demarcación. Por ello, muchos países han desarrollado especificaciones para su propia red vial. Robertson et al. (2013) comentan que se realizaron varios estudios con el fin de identificar la retrorreflectividad residual mínima para la señalización horizontal. Estos valores indican el momento de

intervención y los valores utilizados habitualmente en varios organismos oscilan entre 80 a 100 $\text{mcd.lx}^{-1}.\text{m}^{-2}$ para geometrías de 30 metros y en Brasil debido a que se utiliza la geometría de 15 metros se considera 100 $\text{mcd.lx}^{-1}.\text{m}^{-2}$ como valor residual mínimo. A su vez, WANG et. al. (2004) concluyen que es necesario considerar una retrorreflexión mínima de 150 $\text{mcd.lx}^{-1}.\text{m}^{-2}$ considerando la geometría a 30 metros en EEUU. Así, se concluye que los valores mínimos de retrorreflexión llevan mucho tiempo de estudio y actualmente siguen en discusión.

Factores que influyen en la retrorreflexión

En diversos países se han llevado a cabo estudios para analizar la influencia de diferentes condiciones que afectan la demarcación vial. Sin embargo, los resultados reflejan elevada variabilidad, principalmente en cuanto a niveles de retrorreflexión y su relación con ciertos factores. Algunas experiencias se resumen a continuación:

- Thamizharasan et al. (2002) describen una metodología para estimar la vida útil de la demarcación vial con base a niveles de retrorreflexión, utilizándose datos recopilados de más de 150 sitios. Se encuentra que los factores más importantes que afectan el desempeño de la demarcación vial son: tipo de superficie, material de demarcación, color y el mantenimiento de la demarcación; mientras que el volumen vehicular no mostró ser una variable significativa para el deterioro.
- Rasdorf et al. (2009) encuentra que las líneas de centro se desgastan más rápidamente que las líneas de borde (con material termoplástico), y que la dosificación de microesferas es una variable significativa para un buen desempeño.
- Aktan y Schnell (2004) evalúan la visibilidad nocturna en tres tipos de demarcación vial, incluyendo cinta preformada y pintura vial, con varios tipos de microesferas de vidrio. Las microesferas de alto índice de refracción mostraron mejor desempeño.
- Kopf (2004) incorpora un análisis de curvas de degradación de la retrorreflectividad y determina que el comportamiento de este parámetro a través del tiempo es impredecible y depende de muchos factores. En este proyecto se seleccionan secciones de carretera y se utiliza pintura base solvente y base agua. Plantean que dada la variabilidad de los datos observados no les fue posible, incluso con la recopilación de más datos, crear predicciones de rendimiento con un alto nivel de confianza estadística. El estudio atribuye la variabilidad a los cambios que se generan durante el proceso de aplicación por las diferentes cuadrillas de trabajo, la inherente variabilidad del equipo, diferentes condiciones ambientales al momento de

medir, la profundidad de las microesferas en los diferentes puntos de medición y las inconsistencias propias de la retrorreflectividad.

- La Administración Federal de Autopistas de Estados Unidos (FWHA) también ha investigado sobre la durabilidad de estos materiales, y considera que algunos factores influyentes son: configuración de la demarcación, tipo de superficie, velocidad de los vehículos y el tipo de vehículo (2007).
- Holzschuher et al. (2010) cuantifican el nivel de precisión y la repetitividad de la toma de datos usando un retrorreflectómetro móvil. Los resultados mostraron que las lecturas en un mismo sitio no deberían variar más de $20,1 \text{ mcd.lx}^{-1}.\text{m}^{-2}$; es decir, un 6,7 %, para un nivel de confianza de 95 %.
- Otros autores como Robertson, Sarasua, Johnson & Davis (2013) presentan resultados similares a los mencionados, donde no se logró determinar un modelo de deterioro que describiera el comportamiento de la pintura retrorreflectiva a lo largo del tiempo. Además, se obtuvieron resultados importantes como los factores que intervienen en el deterioro de las pinturas, que se detallan al final de este capítulo; así como información acerca del desempeño de los equipos de medición utilizados y algunos procesos de su calibración.

El aporte de las microesferas de vidrio a la retrorreflexión de la marca vial depende fundamentalmente de la calidad, el grado de hundimiento, la blancura del material base, de los ángulos de iluminación y observación, la cantidad de microesferas y la cantidad de microesferas eficaces. Si hay demasiadas microesferas de vidrio, la visibilidad nocturna puede reducirse debido a que se generan sombra entre ellas. Cabe reiterar que los estudios demuestran que el hundimiento óptimo de las microesferas es un 60 % cuando el índice de refracción es de 1,5 y un 50 % cuando el índice de refracción es de 2. Si se consideran valores de anclaje inferiores al 50% del diámetro de las microesferas, puede perjudicarse su longevidad en la pintura, debido a que están expuestas a ser fácilmente extraídas por la acción del tránsito. El grado de hundimiento de las microesferas de vidrio que ha sido aplicada por post-mezclado, depende de la acción conjugada de tres fenómenos físicos que se oponen al peso de la esfera (Calavia, 1995):

- El empuje de Arquímedes recibido por la microesfera (flotación).
- Los fenómenos de tensión superficial entre la microesfera y el producto.
- La reología del producto.

2.3.2. Resistencia al deslizamiento

La resistencia al deslizamiento es la propiedad de una superficie circular de mantener la adherencia de un neumático. Las marcas viales se aplican sobre la superficie del pavimento y modifican las propiedades superficiales del mismo. Esta variación es tanto mayor cuanto más gruesa sea la capa de pintura que cubre el pavimento, pues ello hace que no se transmita a la superficie de la marca vial la textura del pavimento, por tanto, a más dosificación (o mayor número de capas) menor transmisión de textura.

El coeficiente de rozamiento sobre una superficie seca es generalmente aceptable; pero en mojado, la adherencia entre el neumático y el pavimento debido a la interposición de una película de agua entre ellos se manifiesta con una disminución muy apreciable del coeficiente de rozamiento. Por este motivo, la adherencia en mojado es un parámetro importante para evaluar la seguridad vial. La medición de puntos se realiza utilizando el equipo portátil denominado Péndulo Inglés TRRL, Figura 2-15.



Figura 2-15. Péndulo Inglés TRRL del LEMaC

Fuente: elaboración propia

Este equipo está dispuesto con un brazo móvil y con el extremo cubierto por una zapata de goma, que, en caída libre genera un roce y, frota contra la superficie del piso previamente humedecido. Después de atravesar la superficie, la posición máxima donde alcanza el péndulo se registra mediante un valor, en unidades SRT, indicado en una escala en el disco metálico.

La norma CEN EN 1436/2009 contempla la evaluación de la resistencia al deslizamiento de la pintura de señalización, y prevé distintas clases según los valores. En Argentina, actualmente, la evaluación de la resistencia al deslizamiento no es un requisito obligatorio en las marcas viales.

Se entiende que valores bajos de resistencia al deslizamiento pueden causar deslizamientos cuando se usan en pasos peatonales (demarcación de áreas grandes), donde hay frenadas de ciclistas y motociclistas. La monitorización de dicho parámetro en las pinturas de señalización también puede indicar su desgaste, que tiende a aumentar debido a los efectos del tránsito, que provocan el desprendimiento de las microesferas. No siempre es posible conseguir una alta resistencia al deslizamiento y una alta retrorreflexión. Un aumento en la cantidad de microesferas en la demarcación puede contribuir a una mayor retrorreflexión y una menor resistencia al deslizamiento (HIGWAY et al., 2009 citado por Machado, 2020).

2.4. Factores que afectan a los materiales de señalización vial

La integridad de la demarcación puede sufrir al menos tres mecanismos de falla diferentes: pérdida de material por desgaste abrasivo, falla de cohesión en la capa de pintura (dentro de la capa de pintura) y falla de adhesión entre la pintura y la superficie (interfase).

Como mecanismos que contribuyen a la falla del material, ya sea por falta de cohesión en la capa de pintura, o por adherencia con el sustrato se mencionan los ciclos de temperatura y humedad, el ataque químico de sales y ácidos, daños causados por radiación de la luz, ataque de solventes tales como *gas oil*, aceites, etc.

Con tantos mecanismos de falla posibles, es de esperar que exista una amplia variación en el rendimiento de varios tipos de material. También es la razón por la que las pruebas de abrasión no han tenido un éxito completo en la predicción de la vida útil de las marcas pintadas (Migletz, 1994). La siguiente sección analiza los factores que influyen en la degradación de la pintura.

2.4.1. Acción climática sobre la demarcación

El clima y las condiciones meteorológicas influyen en la eficiencia de la delimitación, la durabilidad de los materiales y las técnicas de aplicación. Durante el día, la lluvia reduce la capacidad visual del conductor y, por la noche, el deslumbramiento de los faros de

los vehículos que se aproximan, la acción del limpiaparabrisas y la superficie del pavimento resbaladizo, junto con la capacidad de retrorreflexión degradada de las marcas del pavimento, favorecen que la conducción sea particularmente peligrosa y difícil. Las marcas pierden rápidamente su retrorreflectividad debido a la película de agua superficial (Migletz, 1994).

La absorción del agua es una característica muy importante para el ámbito de los formuladores de pinturas debido a que el agua incluida en el polímero degrada sus propiedades. El agua es un plastificante del polímero que reduce la resistencia mecánica del *film*. Los recubrimientos con alta absorción de agua pierden, especialmente en procesos cíclicos de sequedad y humedad, el poder ligante de pigmentos y cargas como la adherencia con el sustrato. La absorción de agua está relacionada generalmente con la pérdida de resistencia al frote húmedo (Schweigger, 2005).

Schweigger (2005) plantea que la velocidad de absorción puede ser un criterio importante para evaluar el ensuciamiento de pinturas en la intemperie, ya que a pocas horas la absorción incrusta la suciedad en la película. Con la finalidad de estudiar esta relación, en el Capítulo 4 se realiza una evaluación con las muestras de pintura en estudio.

2.4.2. Material utilizado en la demarcación

La calidad y durabilidad de la señalización horizontal en el pavimento depende de varias características. Sitzabee, et al. (2013) comentan que en los Estados Unidos aproximadamente el 83 % de los materiales que se encuentran comúnmente en las carreteras son pinturas y termoplásticos. En las carreteras secundarias, aquellas con un volumen de tránsito bajo, usan pinturas. Mientras que en las carreteras primarias o de alto tránsito, a menudo se aplican termoplásticos.

Babić et al. (2015) en un estudio evalúa la resistencia a la abrasión de tres tipos diferentes de pinturas de demarcación vial de base acuosa y base solvente utilizando un equipo de desgaste (*Taber Abraser*). En este trabajo se encuentra un buen comportamiento y una menor pérdida de peso por abrasión en las pinturas base agua comparadas con la base solvente. También destacan que los tiempos medidos de resistencia al secado y al lavado, en las pinturas de base agua, resultan adecuados en condiciones favorables, aunque existe la advertencia del riesgo de lavado en caso de lluvia repentina en condiciones de baja temperatura y alta humedad. Por este motivo y

debido a la amplia gama de materiales disponibles se limita el estudio a las pinturas acrílicas comerciales utilizadas en la tesis y descritas en detalle en el Capítulo 4.

2.4.3. Tipo de pavimento y textura superficial

La durabilidad y la visibilidad de la señalización del pavimento están determinadas en gran medida por el tipo y la condición del sustrato. Los materiales del sustrato sobre los que se aplican las marcas de pavimento se dividen en dos categorías: pavimento de hormigón (rígidos) y pavimento asfáltico (flexibles).

Se define como pavimento de hormigón al constituido por materiales inertes (arena, grava, piedras) con un aglomerante (cemento) y con agua, cuyas características o requisitos que deberá cumplir dependen del tipo de vía que se trate y específicamente del volumen de tránsito pesado previsto. De esta forma, se tiene un conjunto de losas de hormigón (simple o armado) separadas por juntas longitudinales y transversales, o bien un conjunto de losas continuas de hormigón (continuamente armado) separadas por juntas longitudinales.

En referencia a los pavimentos asfálticos, se transcriben las definiciones del Pliego de especificaciones de Vialidad Nacional como una breve introducción al tema.

- Concreto Asfáltico en Caliente (CAC) del tipo Denso: combinación de un ligante asfáltico (convencional o modificado), agregados (incluido el *filler*) y eventualmente aditivos y/o fibras. Estas mezclas son elaboradas en plantas asfálticas y colocadas en obra a una temperatura marcadamente superior a la temperatura ambiente.
- Concreto Asfáltico Semicaliente (CAS) del tipo Denso: combinación de un ligante asfáltico (convencional o modificado), agregados (incluido el *filler*) y eventualmente aditivos y/o fibras; elaboradas en plantas asfálticas y colocadas en obra a una temperatura de, como mínimo, treinta grados Celsius (30 °C) por debajo de la temperatura correspondiente al mismo tipo de concreto asfáltico de la tecnología en caliente (CAC).
- Microaglomerado Asfáltico en Caliente (MAC) tipo F: combinación de un ligante asfáltico modificado, agregados (incluido el *filler*) y eventualmente aditivos. Estas

mezclas son elaboradas en plantas asfálticas y colocadas en obra a una temperatura marcadamente superior a la temperatura ambiente. Las mezclas MAC son del tipo discontinuas, es decir que los agregados presentan una discontinuidad granulométrica acentuada, y se utilizan para capas de rodadura en espesores reducidos. Su finalidad es dotar a la carpeta de rodamiento de adecuadas condiciones de resistencia mecánica, macrotextura, resistencia al deslizamiento y propiedades fono absorbentes.

- Microaglomerado Asfáltico en Caliente (MAC) tipo M: combinación de un ligante asfáltico modificado, agregados (incluido el *filler*) y eventualmente aditivos. Estas mezclas son elaboradas en plantas asfálticas y colocadas en obra a una temperatura muy superior a la temperatura ambiente. Las mezclas MAC son del tipo discontinuas, es decir que los agregados presentan una discontinuidad granulométrica muy acentuada, y se utilizan para capas de rodadura en espesores reducidos. Su finalidad es dotar a la carpeta de rodamiento de adecuadas condiciones de resistencia mecánica, macrotextura, resistencia al deslizamiento y propiedades fono absorbentes.
- Concreto Asfáltico en Caliente del tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA): combinación de un ligante asfáltico (convencional o modificado), agregados (incluido el *filler*), fibras y eventualmente aditivos. Estas mezclas son elaboradas en plantas asfálticas y colocadas en obra a una temperatura muy superior a la temperatura ambiente. Su finalidad es dotar a la carpeta de rodamiento de adecuadas condiciones de resistencia mecánica, macrotextura, resistencia al deslizamiento y propiedades fono absorbentes.
- Concreto Asfáltico Drenante en Caliente (CAD): combinación de un ligante asfáltico modificado, agregados (incluido el *filler*) y eventualmente aditivos y/o fibras. Estas mezclas son elaboradas en plantas asfálticas y colocadas en obra a una temperatura muy superior a la temperatura ambiente. Las mezclas CAD poseen una baja proporción de agregados finos y presentan un contenido alto de vacíos interconectados, los cuales le proporcionan características drenantes. Las mezclas CAD se colocan sobre otra capa asfáltica impermeable, por sobre la cual sucede el drenaje del agua.

- Microaglomerado Asfáltico en Frío (MAF): combinación de una emulsión asfáltica (convencional o modificada), agregados (incluido el *filler*) y eventualmente aditivos. Estas mezclas son elaboradas en equipos ambulo-operantes a temperatura ambiente y extendidas en bajos espesores sobre una superficie de pavimento adecuadamente preparada. Dichos espesores se corresponden aproximadamente con el tamaño máximo nominal de los agregados pétreos. Tienen por objeto ser utilizadas para la reconstitución de las condiciones superficiales de rodamiento (mantenimiento preventivo) en estructuras de pavimentos existentes o para obtener condiciones especiales de fricción o superficies de desgaste, en obras nuevas.

Zhang et al. (2013) realiza un estudio en el cual compara la durabilidad de la retrorreflexión de la señalización horizontal en autopistas de Carolina del Norte (EE UU) con diferentes texturas superficiales. Estas diferencias se obtienen debido al tipo de mezcla aplicada como revestimiento en la vía. Se estudia el caso de una mezcla asfáltica preparada en planta (textura baja) y otra obtenida con tratamiento superficial (textura alta). En lugares con texturas superficiales altas (tratamiento superficial) las marcas necesitan ser sustituidas más frecuentemente que en el caso de texturas bajas.

Hawkins y Smadi (2011) realizan un relevamiento en diferentes ciudades de Texas, en las cuales el sustrato en estudio son dos tipos de revestimientos asfálticos. Uno conocido como *seal coat* (revestimiento que utiliza áridos graduados, cemento y emulsión asfáltica) y otro HMAC (mezcla asfáltica en caliente). Los autores destacan que las superficies con textura alta (*seal coat*) presentan valores de retrorreflexión más bajos cuando son comparados con superficies más lisas (HMAC) y se utiliza el mismo material de marcado. Un aumento del espesor de película de pintura en superficies con textura más alta, tiene poco efecto en la retrorreflexión inicial, pero a largo plazo tiene un efecto significativo. En el caso de los revestimientos *seal coat* se destacan otras características:

- Rápido deterioro de la retrorreflexión para los termoplásticos.
- Dificultad de cubrir todos los agregados cuando se emplea el espesor típico de termoplásticos pulverizados.
- El termoplástico es fácilmente arrancado o desgastado en las puntas de los agregados.

- Cuando los agregados se desprenden retiran una pequeña porción de la demarcación.

En base a estos estudios, se resalta la importancia de unificar el tipo de textura en los ensayos que se implementan con la finalidad de obtener resultados comparables.

2.4.4. Posición de la demarcación

Salles et al. (2015) analiza el desgaste de la demarcación horizontal correlacionado con su posición en el camino. Se observa que en las demarcaciones transversales el desgaste es destacado por las huellas de rodadura debido al paso de neumáticos en puntos específicos. La retrorreflexión es levemente mayor en puntos en las líneas de eje que en las líneas de borde, debido a la acción abrasiva de los neumáticos ya que en las líneas de borde hay una acumulación de suciedad. Los autores concluyen que la retrorreflexión es función del tipo de material, de la posición de la demarcación y de la acción del tránsito.

2.4.5. Acción del tránsito (volumen y composición)

En general, el Tránsito Medio Diario Anual (TMDA) es el criterio principal utilizado para seleccionar las técnicas de marcado. Por ejemplo, las carreteras con alta densidad de tránsito pueden recibir un mejor servicio mediante la instalación de materiales de alta durabilidad, como los termoplásticos colocados en caliente o plásticos en frío. Estos materiales duraderos proporcionan una delimitación a largo plazo, por lo que se evita la necesidad de un mantenimiento frecuente. También reducen la exposición de los equipos de mantenimiento al tránsito y la interrupción del mismo. El mayor costo inicial puede equilibrarse con la seguridad y los beneficios económicos a largo plazo.

La composición del tránsito puede afectar la vida útil de los materiales de demarcación. Un alto porcentaje de camiones, colectivos y otros equipos pesados pueden dañar o desgastar las marcas mucho más rápido que el tránsito de vehículos de pasajeros. Por ejemplo, las carreteras rurales, del campo al mercado, de baja densidad o las carreteras de acceso industrial pueden necesitar aplicaciones más duraderas de lo que podría indicar su TMDA (Migletz et al., 1994).

2.5. Estudio de la abrasión en pinturas

La abrasión superficial consiste en las deformaciones permanentes que no producen ruptura en la superficie de un recubrimiento. En este caso la resistencia de un revestimiento al deterioro es su capacidad para resistir las acciones de raspado que tienden a desfigurar o cambiar la apariencia de su superficie. Por otro lado, la abrasión por desgaste es causada por una acción mecánica que remueve material de la superficie de un revestimiento. En muchos casos, la eliminación es gradual o progresiva debido a la acción mecánica repetitiva. A su vez hay que tener en cuenta que, la resistencia a la abrasión no es una propiedad única o aislada de un material, sino que está relacionada con otras características físicas como por ejemplo la dureza, la resistencia a la tracción y cohesión, la elasticidad y la tenacidad.

La tarea diseño de metodologías de prueba que se correlacionen con el rendimiento del uso final es, por lo tanto, compleja y difícil, pero no imposible de desarrollar. Si el método de ensayo somete al material bajo prueba a una combinación de fuerzas destructivas similares a las encontradas en servicio, entonces el método de prueba correlaciona —o predice— el desempeño en servicio del material en al menos un aspecto de clasificación cualitativo o relativo.

Las pruebas de uso final reales, si bien son las más confiables para proporcionar una indicación de la probable durabilidad a largo plazo de un material, adolecen de las dificultades para garantizar un uso y medición equivalentes, especialmente cuando se intenta comparar diferentes materiales. Debido a tales dificultades y debido a que las pruebas de servicio suelen consumir mucho tiempo, existe una amplia variedad de máquinas de prueba para proporcionar una indicación acelerada de la resistencia a la abrasión de los revestimientos y materiales relacionados (Koleske, 2012).

Mecanismo de abrasión

Si un tipo particular de ensayo de abrasión se correlaciona o no con el rendimiento del uso final depende no solo de la similitud de los mecanismos de abrasión y los abrasivos utilizados en ambos casos, sino también del grado en que ese mecanismo se mantiene durante el curso del ensayo. Es en este último factor en el que muchos métodos fallan. Los métodos de frotamiento (fricción) y raspado obviamente desgastan la superficie de prueba de una manera diferente a los métodos en los que las partículas abrasivas entran

en contacto con la superficie. Un aspecto de la diferencia mecanicista radica en el ángulo de contacto con la superficie. Las partículas abrasivas que golpean la superficie de un revestimiento con una incidencia casi normal tienden a comprimir, marcar y cortar el revestimiento. Como resultado, las porciones minúsculas del recubrimiento eventualmente deben cortarse y desplazarse. Por otro lado, los tipos de abrasión por frotamiento y raspado que tienen lugar en una incidencia cercana al raspado tenderían a socavar y cortar capas muy delgadas del recubrimiento en cortes sucesivos e irregulares que finalmente lo desgastan. Los diferentes dispositivos pueden incorporar varios grados de estos procesos básicos, según el ángulo y la fuerza del ataque de las partículas.

Aparte de la naturaleza de los mecanismos anteriores, debería ser evidente que cualquiera sea el mecanismo, no se mantiene uniformemente en los métodos de fricción. Dichos métodos sufren cambios en las condiciones de abrasión a medida que avanza el ensayo, ya sea por calentamiento de la muestra o por obstrucción del abrasivo u otro.

2.6. Modelos de degradación de la retrorreflexión

Sitzabee et al. (2009) realizan una revisión de los documentos relacionados con el tema e identifican cinco estudios que desarrollan varios modelos de degradación de la señalización del pavimento (Andrady (1997); Lee, et al. (1999); Migletz, et al. (2001); Abboud y Bowman (2002); Sarasua et. al. (2003)). En estos estudios, existen grandes diferencias en los modelos de degradación considerados. Tres de los cinco estudios (Lee, et al. (1999); Migletz, et al. (2001) y Sarasua et. al. (2003)) concluyen que las marcas del pavimento se degradan linealmente, mientras que los otros dos concluyen que presenta un modelo de caída logarítmica. Además, Sitzabee et al. (2009) plantean que ninguno de los estudios anteriores analiza el impacto de la ubicación de la línea lateral en el desempeño general de una determinada señalización del pavimento. Lógicamente, el rendimiento de una línea debería depender de su ubicación lateral, ya que algunas líneas como las líneas de carril suelen ser golpeadas por vehículos con más frecuencia que otras líneas como las líneas de borde. De esta forma, examina el efecto de la ubicación lateral de las marcas en la degradación de la retrorreflectividad considerando los sistemas de señalización conformados con materiales termoplásticos. Para el estudio examinan datos recopilados en las carreteras de Carolina del Norte durante un período de cinco años y realizan un análisis estadístico para determinar si había una diferencia significativa en las tasas de degradación de la retrorreflectividad entre las líneas de borde y las líneas centrales. El estudio concluye que existe evidencia

estadística de que la ubicación de la línea lateral tiene un efecto sobre la degradación de la retrorreflectividad y que las líneas centrales se degradan más rápido que las líneas de borde.

Además, Thamizharasan et al. (2002) analizan modelos estadísticos con la finalidad de pronosticar la degradación de la retrorreflectividad de las marcas de pavimento. Este análisis se agrupa en categorías teniendo en cuenta la superficie de la marca, el color (blanco y amarillo) y el material base (termoplásticos y pinturas epoxí). Se presentan tres patrones básicos de disminución o degradación de la retrorreflectividad a lo largo del tiempo. La Figura 2-16 ilustra la retrorreflexión para demarcaciones nuevas (recién aplicadas). En este caso, inicialmente la retrorreflexión aumenta hasta un valor máximo debido al exceso de microesferas que cubren a las que están ancladas o por las que están poco ancladas y son removidas luego de la liberación del tránsito. Luego se produce una disminución en función del tiempo (Thamizharasan et al., 2002.; Sarasua et al. 2003).

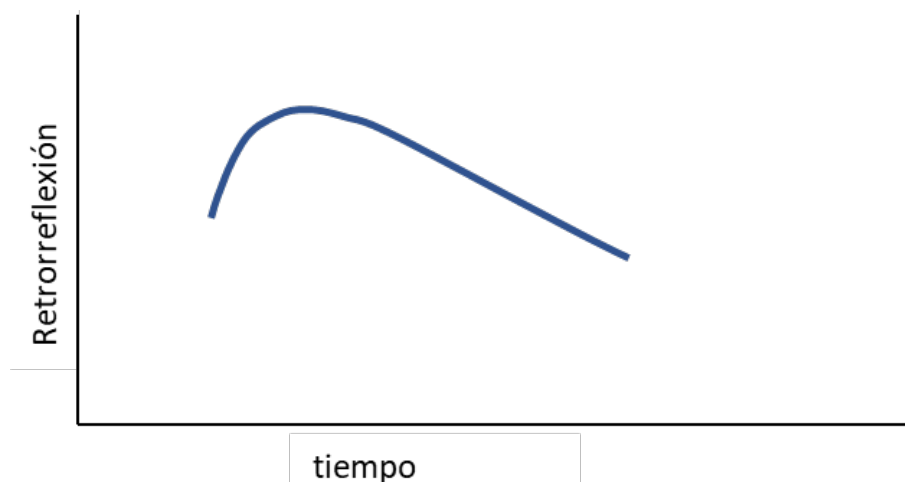


Figura 2-16. Patrón representativo de marcas recién aplicadas

Fuente: (Thamizharasan et al., 2002.; Sarasua et al. 2003) (adaptación propia)

La Figura 2-17 ilustra la degradación de las demarcaciones más antiguas, para periodos mayores a 300 días. En este caso, se representa por una línea recta que gradualmente disminuye con el tiempo. Si bien la tasa de degradación parecía lineal para lecturas superiores a 50 o 60 $\text{mcd.lx}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, la pendiente se aplana a valores más bajos hasta que se vuelve del tipo asintótica.

Este patrón indica que un modelo lineal podría ser suficiente si se aplica para predecir la degradación en marcas establecidas más antiguas porque la principal preocupación es asegurar que los valores de retrorreflectividad se mantengan por encima del umbral

mínimo, que probablemente será de alrededor de $100 \text{ mcd.lx}^{-1}/\text{m}^2$ para las rutas interestatales. Una vez que las marcas envejecen, la degradación se produce lentamente a un ritmo constante (Thamizharasan et al., 2002.; Sarasua et al. 2003).

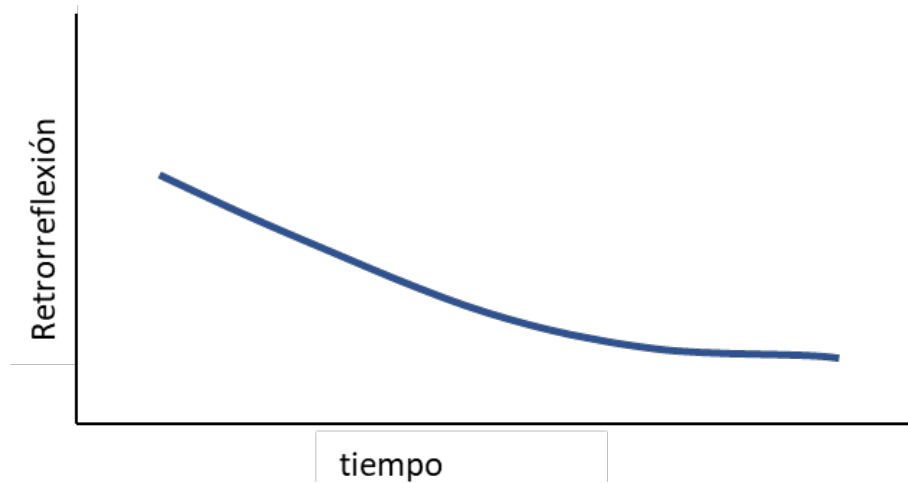


Figura 2-17. Patrón representativo para marcas de más de 300 días
Fuente: (Thamizharasan et al., 2002.; Sarasua et al. 2003) (adaptación propia)

El tercer patrón, Figura 2-18, muestra cambios visibles en la tendencia de retroreflectividad. La magnitud de estos cambios evidencia que son causados por una actividad de mantenimiento como el repintado (que da como resultado aumentos bruscos de la retroreflectividad) o el quitado de nieve (que da como resultado una fuerte caída de la retroreflectividad) (Thamizharasan et al., 2002.; Sarasua et al. 2003).

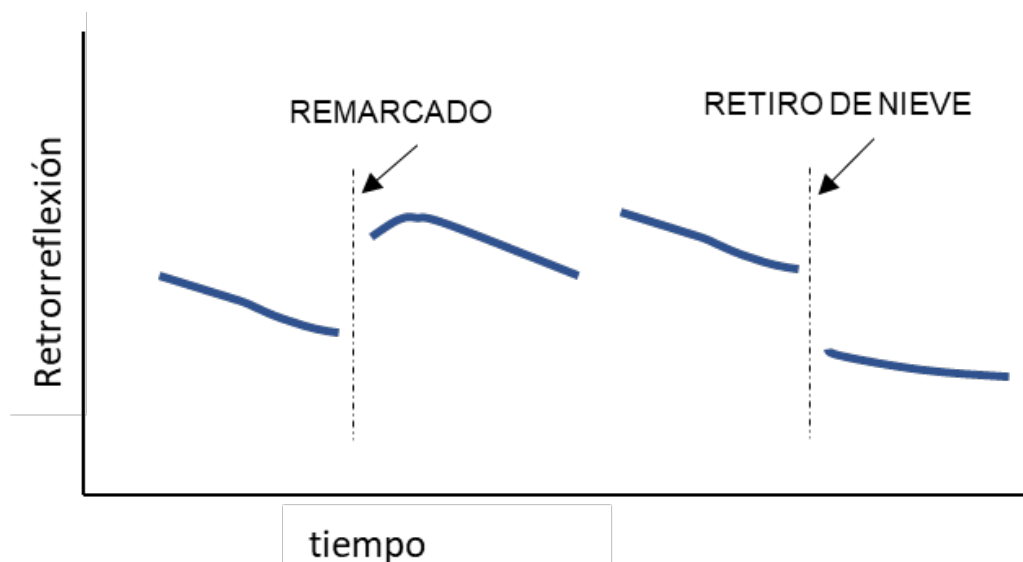


Figura 2-18. Patrón representativo para marcas con cambios repentinos
Fuente: (Thamizharasan et al., 2002.; Sarasua et al. 2003) (adaptación propia)

Referencias

ABBOUD, N. and BOWMAN, B. "Cost and Longevity-Based Scheduling of Paint and Thermoplastic Striping", Transportation Research Record 1794, Paper Number 02-2170, 2002.

AKTAN, F. and SCHNELL, T., "Performance evaluation of pavement markings under dry, wet, and rainy conditions in the field", Transportation research record, 1877(1), 38-49, 2004.

ANDRADY, A., "Pavement Marking Materials: Assessing Environment-Friendly Performance", NCHRP Report 392, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1999.

ASTM, "ASTM E2302: Standard Test Method for Measurement of the Luminance Coefficient Under Diffuse Illumination of Pavement Marking Materials Using a Portable Reflectometer", 2016.

BABIĆ, D., BURGHARDT, T. E., BABIĆ, D., "Application and characteristics of waterborne road marking paint", International Journal for Traffic and Transport Engineering, 5(2), 150-169, 2015.

CALAVIA D., "Demarcación horizontal – Seguridad vial – La visibilidad de las marcas viales – Aspectos fotométricos – Retrorreflexión", Revista Carreteras, Argentina, n 145, pp. 47 a 55, 1995.

CALAVIA, D., "Progreso en señalización horizontal y seguridad viaria", Carreteras: Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera, (190), 27-40, 2013.

CAO YONG, Thesis: "A design of experimental approach to study the road marking luminance contrast and variable message signs", University of Rhode Island, UMI Number: 3145413. ISBN: 0496046322, 9780496046324, 2004.

CARLSON, P. J., PARK, E. S., ANDERSEN, C. K., "Benefits of pavement markings: A renewed perspective based on recent and ongoing research", Transportation research record, 2107(1), 59-68, 2009.

COVES GARCÍA, J. A., Tesis: "Análisis de la Visibilidad y la Resistencia al Deslizamiento de las Marcas Viales Retrorreflectantes en Carretera Convencional", España, 2016.

CRUZ ALCALDE, A., "Optimización de pinturas decorativas base agua mediante aditivos dispersantes y espesantes", 2014.

LAM THANK, D. (2015), Patents; Researchers Submit Patent Application, "Pelletizing System for Road Surface Marking Material", for Approval (USPTO 20150314485) citado por Garcia Coves, 2016.

DE SALLES, L. S., DA SILVA PEREIRA, D., TEIXEIRA, D., SPECHT, L., "Avaliação retrorrefletiva de pintura de demarcação horizontal: peculiaridades e considerações sobre a norma e os requisitos mínimos nacionais", TRANSPORTES, 23(3), 5-17, 2015.

DNV, Dirección Nacional de Vialidad, "Pliego de Especificaciones Técnicas Generales. Argentina", 2017.

DVN, Dirección Nacional de Vialidad, “Manual de señalamiento Horizontal de la Dirección Nacional de Vialidad”, aprobado por resolución 2501/2012, 2012.

FHWA, Departamento de transportes de Estados Unidos USDOT, Administración federal de autopistas FHWA, “Updates to research on recommended minimum levels for pavement marking retroreflectivity to meet driver night visibility needs”, (Informe número: FHWAT-HRT-07-059), Virginia, Departamento de transportes de los Estados Unidos, 2007.

FHWA, Federal Highway Administration, National standards for traffic control devices, “the manual on uniform traffic control devices for streets and highways; maintaining minimum retro reflectivity of longitudinal pavement markings”, Federal Information & News Dispatch, Inc. US.FHWA Docket No. FHWA-2009-0139, p-20935, 2010.

Fish, J., “Evaluation of All-Weather Pavement Markings: Report on Two Years of Progress”, Semisequicentennial Transportation Conference Proceedings, Iowa State University, Ames, Iowa, 1996.

GIUDICE, C., PEREYRA, A., “Tecnología de Pinturas y Recubrimientos: Componentes, Formulación, Manufactura y Control de Calidad”, Editorial edUTecNe (ISBN 978-987-25360-2-2), Facultad Regional La Plata, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina, 2009.

Global and Chinese Road Marking Resins, (2015). Research and Markets, CAS 64742-16-1. Industry Analysis and Forecasts Report 2014-2019. ISSN 1945-5968 citado por Garcia Coves, 2016.

HIGHWAY MARKINGS. A Guide to IS EN 1436 European Standard for Road Marking. Irlanda, 2007. Disponible en: <http://www.highwaymarkings.ie/documents/is_en_1436_1.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2017. Citado por Machado, Deise Dias do Nascimento, 2020.

HOLZSCHUHER, C., CHOUBANE, B., FLETCHER, J., SEVEARANCE, J., LEE, H. S., “Repeatability of Mobile Retroreflectometer Unit for Measurement of Pavement Markings”, Transportation research record, 2169(1), 95-106, 2010.

KOLESKE, J., “Paint and Coating Testing Manual: 15th. Edition of the Gardner-Sward Handbook”, ed. J. Koleske (West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012), 0-FM9, 2012. <https://doi.org/10.1520/MNL12180M>

KOPF, J. “Reflectivity of pavement markings: Analysis of retroreflectivity degradation curves” (No. WA-RD 592.1.), Olympia: Washington State Department of Transportation, 2004.

KUMAR, P., MCELHINNEY, C. P., LEWIS, P., MCCARTHY, T. “Automated Road markings extraction from mobile laser scanning data”, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 32, 125-137, 2014.

LEE, J., MALECK, T., TAYLOR, W., “Pavement Marking Material Study in Michigan”, Institute of Transportation Engineering (ITE) Journal, July, 44-50, 1999.

LEE, D., and DONNELL, E., “Analysis of nighttime driver behavior and pavement marking effects using fuzzy inference system”, Journal of computing in civil engineering, 21(3), 200-210, 2007.

MIGLETZ, J., FISH, J., GRAHAM, J., "Roadway delineation practices handbook" (No. FHWA-SA-93-001), United States, Federal Highway Administration, 1994

MIGLETZ, J., GRAHAM, J., HARWOOD, D., BAUER, K. "Service Life of Durable Pavement Markings", Transportation Research Record 1749, TRB, National Research Council, Washington D.C., 13-21, 2001.

MINISTERIO DE FOMENTO, "Guía para el proyecto y ejecución de obras de señalización horizontal", Editorial Centro de Publicaciones, secretaria general Técnica, Ministerio de Fomento (ISBN 978-84-498-0926-2), España, 2012.

MINISTERIO DE FOMENTO, Artículo 700 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de Carreteras y Puentes (PG-3) Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, 2015.

MOREIRA H. Y MENEGON R., "Sinalização Horizontal", São Paulo: Master Set Gráfica, 2003.

NIESSNER, C. W., "Construction Zone Delineation (raised Pavement Markers)", Report. Department of Transportation, Offices of Research and Development, Implementation Division, 1978.

RASDORF, W. J., HUMMER, J. E., ZHANG, G., SITZABEE, W., "Pavement marking performance analysis", 2009.

ROBERTSON, J., SARASUA, W., JOHNSON, J., & DAVIS, W., "A methodology for estimating and comparing the lifecycles of high-build and conventional waterborne pavement markings on primary and secondary roads in South Carolina", Public Works Management & Policy, 18(4), 360-378, 2013.

SARASUA, W., CLARKE, D., DAVIS, W., "Evaluation of Interstate Pavement Marking Retroreflectivity", Report to South Carolina Department of Transportation, Report Number FHWA-SC-03-01, 2003.

SCHWAB, M., "Estudo do desempenho dos materiais de demarcação viária retrorrefletivos", 1999.

SCHWEIGGER, E. "Manual de pinturas y recubrimientos plásticos", Ediciones Díaz de santos, 2005.

SITZABEE, W., HUMMER, J., RASDORF, W., "Pavement marking degradation modeling and analysis", Journal of infrastructure systems, 15(3), 190-199, 2009.

SITZABEE, W., WHITE, E., DOWLING, A., "Degradation modeling of polyurea pavement markings", Public Works Management & Policy, 18(2), 185-199, 2013.

SMADI, O., HAWKINS, N., ALDEMIR-BEKTAS, B., "Roadway lighting and safety: phase II--monitoring quality, durability and efficiency" (No. IHRB Project TR-601), Iowa State University, Institute for Transportation, 2011.

THAMIZHARASAN, A., SARASUA, W., CLARKE, D., DAVIS, W., "A methodology for estimating the lifecycle of interstate highway pavement marking retroreflectivity", In 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC, 2003.

UNE, "Norma UNE EN 1436: Materiales para señalización vial horizontal. Comportamiento de las marcas viales aplicadas sobre la calzada", 2009.

US Department of Transportation, "Manual on Uniform Traffic Control Devices; for Streets and Highways", US Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2009.

WANG, J. H. and CAO, Y. "Effects of Road Marking Luminance Contrasts on Driving Safety" (No. FHWA-RIDOT-RTD-04-1,). Rhode Island Department of Transportation, Research and Technology Development, 2004

ZHANG, G., HUMMER, J., RASDORF, W., MASTIN, N. "The impact of pavement type and roughness on paint marking retroreflectivity", Public Works Management & Policy, 18(1), 41-55, 2013.

ZWAHLEN, H. and SCHNELL T., "Minimum In-Service Retroreflectivity of Pavement Markings" Transportation Research Record 1715, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 60-70, 2000.

3 - Evaluación de los recubrimientos de demarcación vial

3.1. Introducción

Cualquier marca en el pavimento se deteriora gradualmente con el tiempo y la exposición al tránsito y al clima. A menudo, se define como vida útil de una marca al tiempo entre la aplicación y el momento en que se debe reemplazar la misma. Por lo tanto, la vida útil depende del grado de deterioro aceptable antes de que sea necesario su reemplazo. De acuerdo con el Manual de delineación de carreteras de la FHWA (Federal Highway Administration) de Estados Unidos, la vida útil de las marcas viales se define como "el tiempo necesario para que una marca vial se vuelva ineficaz debido a la pérdida de su brillo, su retrorreflexión o se ha desgastado completamente del pavimento" (Migletz et al., 1994). En consecuencia, existen varias medidas que podrían usarse para definir la vida útil de la señalización vial, por ejemplo, presencia de material (es decir, durabilidad), cambio de color y visibilidad. En teoría, cualquier factor que modifique estas tres propiedades podría influir directamente en la vida útil las marcas viales.

El enfoque de la tesis se orienta a dos de los tres aspectos mencionados anteriormente. Por un lado, el estudio de la durabilidad del material base aplicado específicamente a pinturas acrílicas y; por otro, se considera la evolución de la visibilidad.

Los usuarios de la vía y las autoridades viales exigen eficiencia y durabilidad de las marcas viales en las carreteras. Desde el punto de vista de los primeros, las marcas en el pavimento proporcionan una guía óptica mediante un adecuado contraste durante el día y retrorreflexión durante la noche. Mientras que los costos y el rendimiento influyen en las elecciones de los administradores viales. Además, la selección del tipo de materiales por parte éstos, depende de muchos factores, por ejemplo: el tipo y condición del pavimento, la capacidad de aplicar nuevos materiales sobre las marcas existentes, el nivel de servicio o la calidad de la señalización deseada para una carretera determinada, ubicación geográfica, condiciones climáticas y actividades de mantenimiento del pavimento (Sasidharan, 2009). Y, Zhang et al. (2011) incorporan en la lista el nivel de compuestos orgánicos volátiles (COV) con la finalidad de cumplir con las regulaciones ambientales solicitadas en muchos países.

De Witt et al. (2000) plantean la necesidad de considerar los siguientes puntos para elegir el material:

- Bajo costo inicial.
- Buena visibilidad diurna (condiciones secas y húmedas).
- Buena visibilidad nocturna (condiciones secas y húmedas).
- Resistencia adecuada al deslizamiento.
- Aplicada con mínima interferencia de tráfico.
- Tiempo de secado rápido.
- Baja tasa de desgaste.

Debido a las numerosas variables y la magnitud de tal análisis, los investigadores no poseen suficiente información para desarrollar pautas sobre el uso de marcas particulares en un pavimento para situaciones específicas (Cottrell y Hanson, 2001). Relacionado a esto, en Estados Unidos existen estudios sobre señalización vial realizados por los Departamentos de Transportes de varios estados federales, mientras que a nivel europeo la investigación se realiza principalmente por las empresas que fabrican los materiales utilizados para la demarcación vial.

Asdrubali et al. (2013) resaltan que, en general, la investigación se centra en las carreteras extraurbanas (siempre considerando la retroreflexión como el único criterio) y hay pocos datos disponibles para escenarios urbanos. Por ello, es interesante recordar que se tienen en cuenta distintos aspectos esperables en las marcas viales de una ciudad comparados con las marcas de una carretera.

Por lo anteriormente mencionado, se observa un gran abanico de posibilidades para el estudio de las marcas viales debido a la gran diversidad de materiales base y combinaciones disponibles con las microesferas. Entonces, es necesario delimitar el sistema de estudio y las variables consideradas. De esta forma, se analizan los ensayos disponibles para la evaluación del desempeño de las marcas viales, en los aspectos mencionados de durabilidad y visibilidad, y se establecen las limitaciones del estudio en cada uno de los ensayos que se implementen.

3.2. Desempeño de los materiales viales

En la antigüedad, la vida útil esperada de un material de señalización vial se basaba en el desempeño anterior de materiales similares. Este enfoque basado en la experiencia es inexacto debido a que existen muchos factores que afectan el desempeño de un material de señalización vial. Además, los nuevos materiales pueden tener un comportamiento diferente a sus predecesores u homólogos del mismo tipo.

Existe una clara necesidad de una metodología más rigurosa para definir y predecir la vida útil de un material de señalización vial. Es decir, existe la necesidad de determinar cuándo un material de señalización de pavimento ya no es útil. Así, dada una condición de terminación cuantificada de un material de señalización vial, ¿cómo se puede pronosticar la vida útil restante? Tradicionalmente, el rendimiento de un material de señalización vial se juzgaba principalmente en función de su retrorreflexión. En numerosos estudios se utilizan la retrorreflexión como un factor importante en el análisis del rendimiento y la rentabilidad de estos materiales (Zhang y Wu 2010). Por ejemplo, Cottrell y Hanson (2001) utilizan la retrorreflexión, junto con el costo de instalación y la vida útil, para determinar la rentabilidad de los materiales de señalización del pavimento. Los autores relacionan la vida útil de un material de señalización vial con la duración en que se mantiene un cierto nivel de retrorreflexión que, como se destaca en el Capítulo 2, aún no es posible establecer un consenso universal respecto al valor límite que se debe considerar.

Como se mencionara, la vida útil de un material de señalización vial varía según el tránsito, la superficie donde se va a aplicar y las condiciones climáticas. Además, varía significativamente entre tipos de materiales base empleados. De esta forma, se tiene por ejemplo desde un promedio de uno o dos años para el caso de pinturas base acuosa a cuatro o cinco años para termoplásticos colocados por extrusión.

La última tendencia para la predicción de la vida útil es la utilización de métodos estadísticos basados en datos históricos recopilados. En esta línea, Thamizharasan et al. (2002) desarrollan modelos de regresión para pronosticar el ciclo de vida de la retrorreflexión mediante el análisis de datos obtenidos a lo largo del tiempo considerando marcas conformadas con materiales termoplásticos y pintura epoxi. También, Migletz et al. (2001) desarrollan modelos de regresión para establecer relaciones entre los valores de retrorreflexión y el tránsito. Sin embargo, según Zhang y Wu (2010) estos modelos de regresión, por lo general, tienen valores de R^2 bajos como para considerarse estadísticamente válidos y, además no presentan límites de intervalo de confianza. Asimismo, aseguran que asumir un cierto tipo de función de la regresión (como exponencial negativo, logarítmico o parabólico) a lo largo de la vida útil carece de apoyo teórico y práctico y puede haber simplificado demasiado el problema.

Las pruebas de campo de distintas pinturas requieren mucho tiempo y las pruebas de laboratorio convencionales, como el método de caída de un abrasivo, el ensayo *Taber Abraser* y el *WeatherOmeter*, no producen los mejores resultados (Migletz, 1994).

Teniendo en cuenta las diferencias entre los distintos organismos que estudian la predicción de la vida útil en el ámbito de la retroreflexión y que las pruebas convencionales en los materiales base no han dado los mejores resultados es factible considerar que podrían incorporarse estudios en los materiales que se relacionen con el comportamiento en servicio y evalúen la durabilidad de estos materiales base.

Según Migletz (1994) existen tres razones para evaluar el desempeño de una pintura. Primero, las evaluaciones de desempeño ayudan a calcular la rentabilidad de las marcas pintadas en comparación con otros materiales. En segundo lugar, es necesario evaluar las muestras de pintura para determinar el mejor producto. En tercer lugar, se debe saber cuánto tiempo una señalización vial proporciona una delimitación adecuada para poder programar su repintado.

En general, en los departamentos de Transporte de los distintos estados de EEUU, se consideran la retroreflexión, la durabilidad, el contraste y el color como los principales factores para la evaluación del rendimiento de las marcas viales. Además de estos, algunas normas nacionales europeas también exigen el coeficiente de luminancia con iluminación difusa y la resistencia al deslizamiento como medidas de rendimiento adicionales.

3.3. Especificaciones sobre pinturas de demarcación vial

Según Migletz (1994), las especificaciones de pintura de demarcación pueden realizarse considerando la composición química o mediante evaluación del desempeño. El costo y la disponibilidad de algunos de los componentes químicos utilizados en la fabricación de pintura varían constantemente; por este motivo, las especificaciones de composición detalladas que se utilizaban en el pasado, en general, se reemplazan por especificaciones de desempeño. En algunos casos, se utiliza una especificación que combina rendimiento y composición. Para lo cual, se indica el porcentaje en peso de cada ingrediente por clasificación genérica sin especificar un nombre de marca o fórmula química. En los siguientes párrafos, se profundiza en las características de los tipos de especificaciones que pueden utilizarse.

Como se ha mencionado en el Capítulo 2, las pinturas viales base acuosa han mejorado drásticamente desde su introducción hace más de 25 años, debido a las mejoras en la tecnología de polímeros utilizados para las mismas. En la actualidad, las pinturas se diseñan para satisfacer las necesidades de la industria de la demarcación vial, sin embargo, Greyson et al. (2017) destacan que el mayor rendimiento sólo se logra cuando las especificaciones se mantienen actualizadas.

En Estados Unidos, debido a los numerosos Departamentos de Transporte que existen, se tiene una disparidad significativa en las especificaciones en términos de enfoque, requisitos, tipos de ensayos y procedimientos. Además, Greyson et al. (2017) indican que las especificaciones suelen contener ensayos desactualizados, redundantes o que no predicen o no se correlacionan con el rendimiento en el campo. Es necesario que las especificaciones de pintura vial se adapten para la calificación, selección y control de calidad de las nuevas tecnologías y productos de la industria de señalización de pavimentos. De esta manera, estos autores realizan un análisis detallado de las distintas especificaciones empleadas en EEUU y destacan que, en el caso de las pinturas base acuosa, difieren no sólo en detalles menores, sino que presentan distintos enfoques.

La naturaleza de la oferta de la mayoría de las adquisiciones de pinturas viales incentiva a los fabricantes a desarrollar formulaciones de bajo costo, y se requieren especificaciones de pintura sólidas para garantizar que el rendimiento de la pintura coincida con el deseado. Aunque algunas especificaciones se han actualizado, muchas otras han estado sujetas a revisiones menores durante los últimos 25 años. Para ampliar lo comentado, se realiza una breve descripción de los cuatro tipos básicos de especificaciones para las pinturas viales base acuosa utilizadas en los distintos Departamentos de Transporte de los EEUU:

- **Especificaciones sobre la composición de la pintura:** todos los componentes de las pinturas y sus cantidades están estrictamente prescritos. Un ejemplo de este tipo de especificaciones se tiene en el Departamento de Transporte de Texas (TXDOT, 2017). Este tipo de especificación asegura que la pintura sea similar año tras año. Así, brinda confianza en su desempeño, pero limita la innovación. Cuando ocurren verdaderas innovaciones, se debe evaluar la nueva tecnología y decidir si aceptar nuevas materias primas como equivalentes.
- **Especificaciones sobre composición general y ensayos de calidad o rendimiento:** Estos requisitos no especifican proveedores, grados o pesos exactos

de las materias primas, en cambio, definen un rango de composición aceptable para la pintura. Un ejemplo es la especificación federal TT-P-1952F para las pinturas viales y de aeropuertos, que ha sido revisada durante un período que abarca desde 1976 (Versión 1952A) hasta 2015 (Versión 1952F). Estas revisiones reflejan el avance de las marcas de pintura base acuosa. En consecuencia, la versión actual incluye cada uno de los avances en esta tecnología. En este tipo de especificación, las pinturas deben estar dentro de un espacio de composición estrecho y cumplir con una lista extensa de requisitos de ensayos.

- **Especificaciones que combinan ensayos de laboratorio y ensayos en campo:** La selección se realiza mediante pruebas en carreteras. Generalmente se utilizan plataformas de prueba transversales aplicadas en las plataformas del Programa Nacional de Evaluación de Productos de Transporte (NTPEP) de AASHTO, con ensayos de laboratorio diseñados para identificar y proporcionar control de calidad de pinturas seleccionadas.
- **Especificaciones por garantía:** Este esquema de adquisición elimina por completo los ensayos de laboratorio y se basa totalmente en el rendimiento mediante el control de la retroreflexión de marcas aplicadas. Los contratistas deben cumplir y mantener una retroreflexión mínima en la carretera durante la vigencia del contrato. Las especificaciones de este tipo, teóricamente, brindan al contratista y al formulador la mayor flexibilidad para innovar y optimizar los costos siempre que cumplan con el rendimiento especificado. De esta forma, también se reducen los ensayos de laboratorio de la agencia de control, pero requiere un monitoreo continuo del desempeño en el campo. Debido a la variación en la durabilidad del marcado con el clima y la dificultad de mantener ciertas carreteras, algunos contratistas se sienten incómodos al brindar una garantía de desempeño. Esta incomodidad puede aumentar los costos en relación con otros tipos de especificación.

Además, en el interesante trabajo realizado por Greyson et al. (2017) destacan que existen ensayos y propiedades que son fáciles de evaluar y que brindan buenos resultados y, otros no tienen sentido. Por ejemplo, las restricciones de composición relacionadas con contenido de pigmentos y aglutinantes son útiles para asegurar una velocidad de secado adecuada (mejora con un mayor contenido de aglutinante). En cambio, la resistencia al frote abrasivo no fue una guía útil para predecir el desempeño de durabilidad de la pintura en ese caso (comparados con pruebas de campo). Además, resaltan la utilidad de una exploración por espectroscopia infrarroja por transformada de

Fourier (FTIR). En este caso, dos pinturas en tres plataformas de prueba NTPEP (PA1998, TX1998 y PA2000, donde PA indica Pensilvania y TX indica Texas) en las que la única diferencia en la formulación de la pintura fue el tipo de polímero, condujo a resultados con diferencias significativas en la retrorreflexión después de 1 año. Debido a esto, el único ensayo de laboratorio común que podía distinguir estas pinturas era un ensayo de FTIR y, por el contrario, los ensayos de resistencia al frote no presentaron ninguna diferencia entre las dos pinturas.

3.4. Tecnologías utilizadas para la evaluación de los materiales

La evolución de las propiedades esenciales de las marcas viales (visibilidad y resistencia al deslizamiento), del color y la durabilidad depende del material, su resistencia a la abrasión del tránsito, la técnica de aplicación y la adhesión entre el recubrimiento y el sustrato (Ministerio de Fomento, 2012).

En general, y con la idea de repasar aspectos comentados, se considera que las marcas deben ser reemplazadas cuando el valor de la retrorreflexión (medido en $\text{mcd.lx}^{-1}.\text{m}^{-2}$) cae por debajo de un nivel aceptable, en relación con la geometría de medida y el color que se considere. La velocidad de degradación de la retrorreflexión puede estar influenciada por muchos factores, como el tipo de material y el volumen del tránsito.

La eficacia de los programas de mantenimiento de marcado de pavimento podría mejorarse con modelos estadísticos que estiman la degradación de retrorreflectividad con el tiempo (Ozelim, 2014). Este aspecto, como ya se ha mencionado, genera objeciones de otros autores que no avalan los modelos considerados. De todas formas, se cree que es útil estudiar algunos modelos y poder comparar o conocer una aproximación del comportamiento esperado pero que es necesario abordar la problemática con ensayos simples que permitan estimar el comportamiento de forma rápida y sencilla.

La Durabilidad de los materiales utilizados en señalización horizontal expresa su capacidad para obtener los valores mínimos de los requisitos de calidad exigidos para las marcas viales. La durabilidad, en algunos métodos, se mide como “pasos de rueda”. Los parámetros que se evalúan en los ensayos de durabilidad según la normativa europea son la retrorreflexión en húmedo, en seco y bajo lluvia, el coeficiente en iluminación difusa, el color y la resistencia al deslizamiento. En la evaluación de la durabilidad, los que han demostrado mayor influencia en el desgaste de las marcas viales son el paso de ruedas (tránsito) y la macrotextura del pavimento sobre el que debe adherirse la marca. La climatología no ha demostrado una gran

influencia y para su determinación se llevan a cabo ensayos indirectos sobre los materiales base, como por ejemplo la resistencia a la radiación UV (Ministerio de Fomento, 2012).

Con el objetivo de poner en evidencia las tecnologías existentes en el ámbito de la evaluación de las marcas viales, se presentan los distintos equipamientos y ensayos disponibles a nivel mundial para que, con esta información sea posible estudiar ensayos utilizables en laboratorios viales.

3.4.1. Ensayo de referencia

Como se presenta en el Capítulo 1, este método consiste en aplicar la marca en un tramo de ruta y observar su evolución en el tiempo, Figura 3-1.



Figura 3-1. Ejemplo de ensayo de referencia

Fuente: Calavia, 2007

Es un método que requiere un tiempo considerable para su evaluación y, a su vez, las medidas de comportamiento son difíciles y costosas de realizar. Por este motivo, no se profundiza en este método.

Se puede mencionar, por ejemplo, un trabajo de Babic et al. (2015) en el cual realizan una aplicación de campo en una carretera croata de dos carriles muy transitada. La finalidad es evaluar; (1) la viabilidad y la facilidad de aplicar pinturas de señalización vial en base acuosa en Croacia, (2) el rendimiento de las pinturas y (3) el uso de varias microesferas de vidrio para comparar la retrorreflexión y su retención en condiciones normales de uso. En este trabajo se concluye que las pinturas para señalización de

carreteras base acuosa parecen ser una alternativa viable a las pinturas base solvente que se utilizan actualmente. Los tiempos de secado y de resistencia al lavado medidos fueron excelentes debido a condiciones favorables en el momento de la aplicación. Las pinturas base acuosa se secaron significativamente más rápido que los materiales comparables base de solvente. Sin embargo, los autores advierten sobre el riesgo de lavado en caso de una lluvia repentina y un secado más lento, a baja temperatura y alta humedad. La adhesión de las microesferas de vidrio parece mejor en comparación con las pinturas base de solvente con mejor retención de la retrorreflexión, no obstante indican que los resultados de la prueba son demasiado recientes para concluir positivamente.

En otro trabajo que realizan Burghardt et al. (2016), demuestran en base a esta prueba que los sistemas de señalización vial que consisten en pinturas base acuosa con microesferas de vidrio de alta calidad son una alternativa viable a las pinturas base solvente que se utilizan en la actualidad.

3.4.2. Pruebas de campo

Otro método para la evaluación del desempeño de los materiales de señalización horizontal es la construcción de un tramo experimental en campo, ya sea en carreteras o en campos de prueba en sí mismos.

La norma ASTM D713 proporciona especificaciones para realizar pruebas de campo de las marcas viales en la carretera. En Estados Unidos, el NTPEP (National Transportation Product Evaluation Program) realiza secciones de prueba de campo utilizando esta norma. Los tramos de prueba se encuentran ubicados en todo el país y los datos se agrupan para ser utilizados por cualquier agencia de transporte.

Carlson et al. (2013) destacan que durante la planificación de la prueba es necesario tratar de reducir el número de variables, para evitar la dispersión de los resultados del estudio. En conjunto con la norma ASTM D713/1990, se utiliza la norma ASTM D913/2003 para evaluar el grado de resistencia al desgaste de las pinturas de demarcación vial que, con dicha finalidad, establece estándares fotográficos para una evaluación comparativa.

Mizera (2008) menciona que los tramos experimentales que realiza NTPEP, se realizan cada año en dos zonas geo-climáticas diferentes en los Estados Unidos. Los materiales

utilizados, además de probarse en campo, también se ensayan en laboratorio. La construcción de tramos para evaluación reduce la necesidad de que las agencias estatales realicen pruebas por su cuenta. En cuanto al posicionamiento en la señalización vial de las marcas viales, como se detallará en párrafos posteriores se puede realizar mediante líneas transversales o líneas longitudinales a la dirección del tránsito.

Las normas europeas abarcan este ensayo en la UNE EN 1824/2012. En las mismas, se especifica que las marcas a evaluar son aplicadas en calles cuya superficie sea asfáltica de una edad de por lo menos 1 año, sin reparaciones previstas durante el periodo en que se va a evaluar y sin la presencia de huellas, fisuras o defectos similares. En primera instancia, se valora la macrotextura de la superficie mediante el método del parche de arena para establecer la clase del sustrato registrando las clases de texturas como RG1, RG2, RG3 y RG4 de acuerdo con lo indicado por la Norma UNE EN 13036-1/2010. Las marcas viales se aplican en patrones que pueden ser en líneas transversales, Figura 3-2; o en líneas longitudinales, Figura 3-3 considerando el sentido de circulación de los vehículos. Para este último caso, es necesaria un área de medición que, en el caso de los patrones transversales no es necesaria. Si se utilizan ambos patrones, transversal y longitudinal, en el mismo sitio se hacen en partes separadas de la zona de prueba. La evaluación del material se realiza por un periodo de tiempo superior a 6 meses.

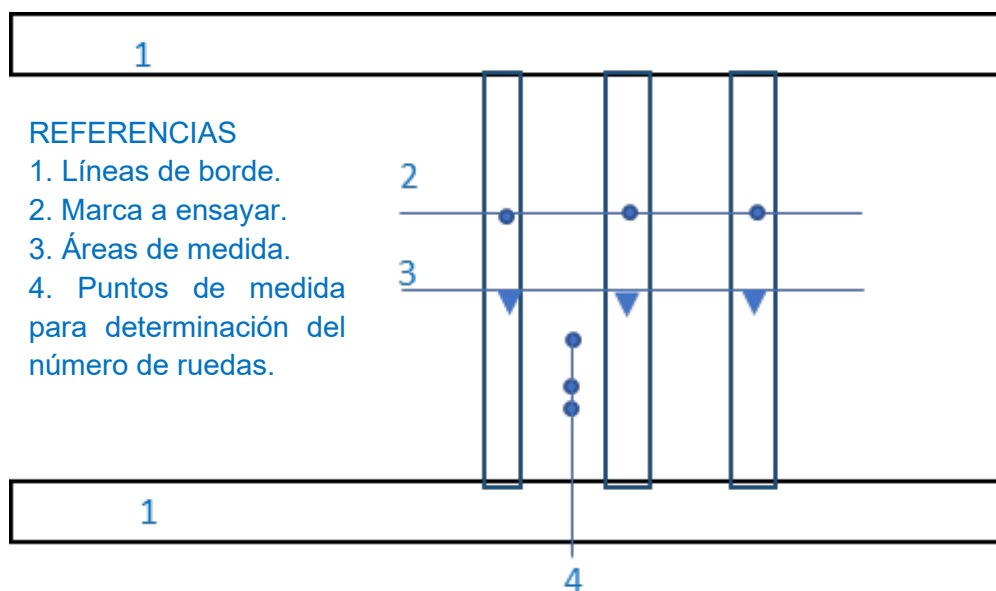


Figura 3-2. Esquema de campo de ensayo con patrón transversal

Fuente: Norma UNE 1824/2012 (adaptación propia)

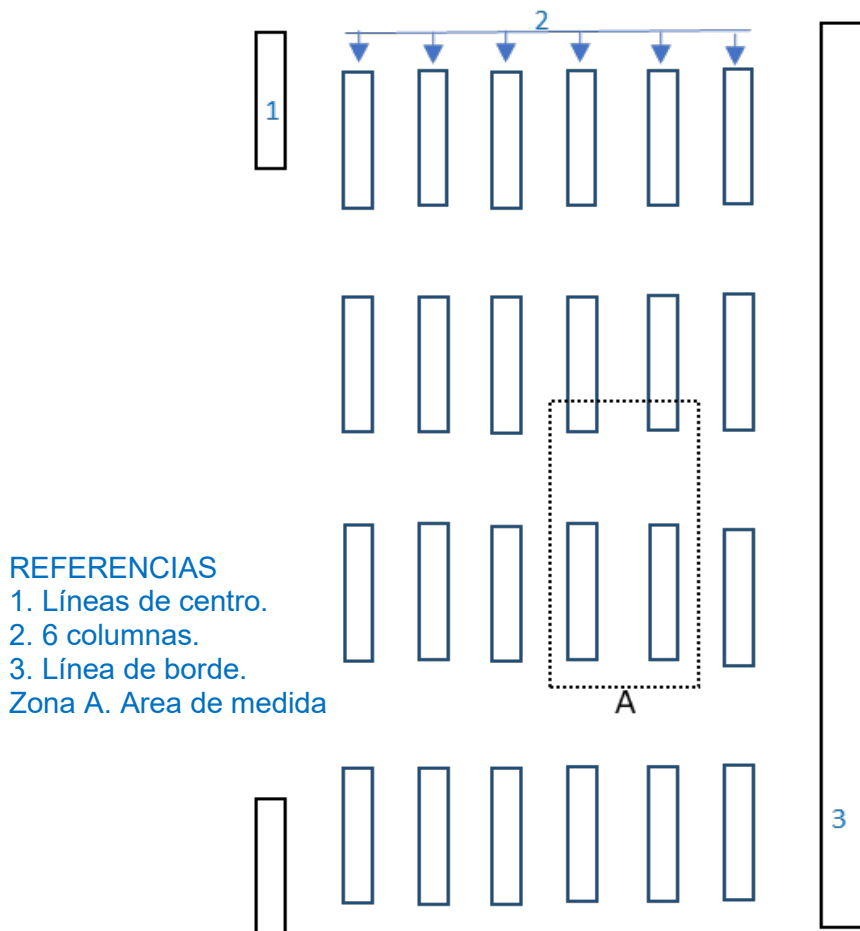


Figura 3-3. Esquema de campo de ensayo con patrón Longitudinal

Fuente: NORMA EN 1824/2012 (adaptación propia)

De forma similar, en EEUU, las plataformas de prueba transversales se instalan utilizando el protocolo establecido por los estándares de NTPEP (AASHTOa, 2004; AASHTOb, 2004). Estos documentos indican el diseño de la plataforma de prueba, las condiciones de instalación adecuadas y la forma de recopilar datos después de la instalación.

Las plataformas de prueba longitudinales se instalan en la misma ubicación y dirección que las marcas viales. Esto permite colocar las marcas en circunstancias normales y someterlas a las condiciones típicas del tránsito. Dichas plataformas de prueba proporcionan condiciones reales de instalación y desgaste de las marcas; así como un entorno en el que la durabilidad se puede medir y controlar con precisión. Sin embargo, estas plataformas de prueba longitudinales no tienen un protocolo para la ubicación, las condiciones de instalación o los procedimientos de recopilación de datos como se indica en el otro tipo de plataforma. Esto puede causar variaciones en el diseño de una plataforma de prueba respecto a otra; y, a su vez, dar lugar a variaciones en los

resultados entre estudios que, son normales si se aplican marcas viales en las carreteras (Carlson et al., 2013).

Coves (2016) estudió tres tramos de prueba experimentales aplicando la normativa española en carreteras convencionales distribuidas en la Provincia de Alicante, en España. En el primer estudio, analizó 81 combinaciones de materiales variándose el tipo de material base, el material de post-mezclado, sus dosificaciones y los sistemas de aplicación. Para ello, estudió los dos parámetros fundamentales: factor de luminancia β y la retrorreflexión RL en seco, para las probetas recién aplicadas, al mes y a los seis meses de antigüedad.

Para el segundo estudio, utilizó materiales y sistemas de aplicación nuevos consiguiendo 14 probetas en cada sentido de circulación, que forman un total de 28 probetas. Éstas fueron ejecutadas *in situ* y se analizaron los parámetros esenciales de las marcas viales: factor de luminancia β , retrorreflexión RL en seco y coeficiente de rozamiento SRT.

El tercer estudio estuvo compuesto por 18 combinaciones de materiales para cada sentido de circulación, con un total de 36 probetas. En este caso, los parámetros característicos analizados de las probetas son: factor de luminancia β , coordenadas cromáticas (x,y), coeficiente de luminancia en iluminación difusa Qd, retrorreflexión RL en seco, retrorreflexión RL en húmedo y coeficiente de rozamiento SRT para las 36 probetas recién aplicadas, al mes, a los 6 meses, a los 12 meses y a los 18 meses desde su fabricación. Finalmente, tras el análisis cuantitativo y cualitativo de todos los parámetros fotométricos que caracterizan las marcas viales, consiguió establecer el sistema de señalización vial horizontal óptimo para carretera convencional y sus pautas de comportamiento a lo largo del tiempo.

Greyson et al. (2017) plantearon que las especificaciones que requieren datos de rendimiento mediante ensayos de campo, como los de las plataformas de prueba NTPEP, también pueden brindar a los formuladores mucha libertad para optimizar e innovar en los materiales. Sin embargo, una desventaja obvia es la necesidad de un extenso trabajo y recursos para realizar pruebas de campo de todas las variaciones de formulación. Otro inconveniente de las pruebas de campo es que las pinturas viales y las microesferas de vidrio pueden especificarse por separado, aunque se ensayen juntas. Incluso cuando se limitan a una geografía determinada, las pinturas pueden proporcionar un rendimiento drásticamente diferente de un año a otro (por ejemplo,

debido a la severidad del invierno). Por lo tanto, una pintura podría aprobarse en función de su rendimiento durante un invierno muy ligero, y una pintura de mejor calidad probada durante un año más desafiante podría fallar. Incluso, pueden ocurrir variaciones de un día a otro o de una semana a otra (para NTPEP) debido a las variaciones climáticas y las características del tránsito durante los primeros días (por ejemplo, la diferencia en el tránsito durante los días de semana y los fines de semana).

Los autores comentan que han aplicado numerosas pinturas similares de control en las mismas carreteras sucesivamente cada año durante más de 25 años y, hay casos en los que la retroreflexión y la presencia de la pintura después de un invierno ha sido el doble o la mitad que la de la misma pintura aplicada en un año diferente o en una época del año diferente. Por este motivo, plantean un cambio en los protocolos comunes de plataforma longitudinal y transversal (por ejemplo, NTPEP) que, según ellos, podría mejorar en gran medida el rigor experimental; este cambio es la aplicación de una pintura de referencia estándar por cada aplicador en cada día de aplicación. La aplicación de la pintura de control al inicio y al final de una plataforma también puede demostrar y corregir cualquier variación en el rendimiento que pueda resultar de la diferencia de tiempo entre la aplicación de pintura y la apertura al tránsito.

En resumen, las plataformas de prueba producen una instalación y una condición de desgaste más realistas, pero pueden requerir un período de tiempo prolongado para alcanzar el nivel deseado de deterioro y poder estimar la vida útil. Los resultados de las pruebas de campo transversales pueden ser útiles para comparar materiales entre sí y para fines de prueba, pero dichos resultados pueden no ser representativos de cómo se va a comportar el material cuando se coloque en una carretera convencional. Por el contrario, las pruebas de campo longitudinales permiten que las marcas se coloquen en circunstancias típicas y están sujetas a condiciones normales de tránsito, pero es más complicada su evaluación. Finalmente, Donnell et al. (2009) plantean que el costo para el fabricante de participar en una evaluación de plataforma de prueba NTPEP es elevado por un solo producto de un color específico.

Además, en algunos casos se utilizan estas plataformas de prueba con la finalidad de modelar la degradación de la retroreflexión de las marcas viales para proporcionar estimaciones de la vida útil, como se mencionara anteriormente en el Capítulo 2. El inconveniente del análisis, en estos casos, es la falta de conocimiento sobre cómo se compara la degradación de las marcas transversales con la de las marcas longitudinales.

Pike y Songchitruksa (2015) estudiaron la relación entre el área de desgaste acelerado en una marca transversal con el desgaste típico en una marca longitudinal. Su objetivo es desarrollar un modelo para predecir los valores de retrorreflexión de las marcas viales longitudinales a partir de los datos de la plataforma de prueba con marcas transversales. Estos modelos y los parámetros asociados se utilizan para estimar la retrorreflexión de una marca correspondiente a una línea de borde o el tiempo que va a tardar dicha marca en alcanzar un nivel de retrorreflexión dado. Este estudio presenta limitaciones de los datos, por ejemplo, que algunos materiales debieron excluirse porque no se pudo modelar la retrorreflexión.

3.4.3. Simuladores de desgaste

El Comité Europeo de Normalización prevé la evaluación del desgaste de las pinturas de señalización vial mediante la norma EN 13197/2012, con el uso de simuladores de desgaste (*Wear Simulators*), tanto para su uso en demarcaciones temporales como permanentes. Estos incluyen el simulador de desgaste del Instituto Federal de Investigación de Carreteras (BASt) en Alemania y el simulador de desgaste de la Asociación para el Estudio de las Técnicas de Equipamiento de Carreteras (AETEC) en España.

Este tipo de equipos aporta una serie de importantes ventajas como el control de las condiciones climáticas, los pasos de neumáticos se aplican en poco tiempo, y las pruebas se realizan sin interrupción del tránsito, además de cuestiones de seguridad asociadas al proceso. Las pinturas de señalización se aplican sobre losas de pavimento con superficie asfáltica densa (granulometría densa), de esta manera se acelera el resultado porque la textura del pavimento asfáltico interfiere menos en los resultados. En la Figura 3-4 se muestra un esquema del equipo de ensayo y en la Figura 3-5 uno de los equipos disponibles en Europa (Ministerio de Fomento, 2012).

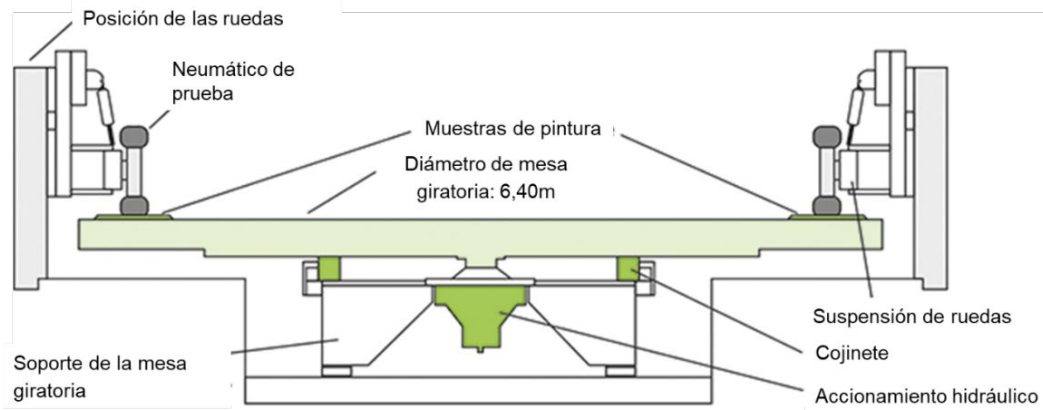


Figura 3-4. Esquema del simulador de desgaste

Fuente: Bast, 2017 (Traducción propia)



Figura 3-5. Simulador de Desgaste "Mesa giratoria"

Fuente: Ministerio de Fomento, 2012

El simulador de desgaste acelerado BAST tiene un diámetro de 6,4 m, en el cual se pueden evaluar hasta 72 muestras de marcas viales en simultáneo mediante la utilización de hasta ocho cargas de rueda en una plataforma giratoria de acero circular. En el equipo, es posible simular un año de cargas de tránsito en un entorno de carretera en aproximadamente 1 semana (proporción 50: 1). Entre otras experiencias, se realiza una prueba de resistencia aplicando hasta ocho clasificaciones de cargas de tránsito diferentes según el uso previsto de la muestra de señalización vial.

Por otro lado, el simulador de desgaste AETEC fue desarrollado por cuatro empresas españolas de señalización vial y una empresa de microesferas de vidrio. Al igual que el simulador de desgaste acelerado BAST, el simulador AETEC puede evaluar (precalificar)

hasta 72 muestras de prueba en un plato giratorio a una velocidad de casi 1 millón de ciclos por semana. Cuatro ruedas aplican cargas a las probetas a una velocidad de 5 o 35 mph (10 o 60 km/h) (Donnell et al., 2009).

El procedimiento de ensayo se basa en aplicar el material de acuerdo con las instrucciones proporcionadas por el fabricante sobre una placa de ensayo con una macrotextura seleccionada. Cada uno de los tipos indicados, tiene un valor límite de profundidad media de textura (mm) según la norma UNE EN 13036-1/2010 (Tabla 3-1).

Tabla 3-1. Clases de textura
Fuente: Ministerio de Fomento, 2012 (adaptación propia)

CLASE DE TEXTURA	PROFUNDIDAD MEDIA DE TEXTURA (MM) SEGÚN NORMA UNE EN 13036-1/2010
RG1	$\leq 0,60$
RG2	$>0,60 \leq 0,90$
RG3	$>0,90 \leq 1,20$
RG4	$>0,90 \leq 1,20$

Las probetas se acondicionan antes de ser sometidas al ensayo. Luego se colocan en el simulador de desgaste en el que se someten al efecto del paso de neumáticos circulando sobre ellas a distintas velocidades y ángulos. Además, se somete a las muestras a ciclos de condiciones de rociado de agua y seco. Al inicio del ensayo y en la frecuencia de paradas y medidas establecidas en la norma europea, se llevan a cabo las evaluaciones de las visibilidades y resistencia al deslizamiento que se obtienen a lo largo del ensayo. El mismo finaliza cuando alguno de los parámetros presenta valores por debajo de los umbrales mínimos requeridos. Las frecuencias de parada y medida son: 10.000, 50.000, 100.000, 200.000, 500.000, 1.000.000, 2.000.000 y 4.000.000 pasos de rueda. El resultado se expresa como clase de comportamiento (P1, P2, P3, P4, P5, P6 y P7) para cada clase de textura sobre la que se ha realizado el ensayo en el simulador de desgaste (Ministerio de Fomento, 2012).

El resultado logrado por una marca vial en el ensayo de durabilidad se obtiene para unas condiciones controladas de aplicación y ensayo que garantizan la repetitividad y la reproducción de los resultados. Este método presenta como principal desventaja la condición de que existen pocos equipos disponibles a nivel mundial, por lo que el ensayo resulta costoso.

3.4.4. Abrasión por el método de caída de un abrasivo

Este método de ensayo consiste en determinar la resistencia a la abrasión cuando se produce la caída de un material abrasivo sobre una probeta en la que se ha extendido una película de material a ensayar, utilizando un aparato como se muestra en la Figura 3-6.

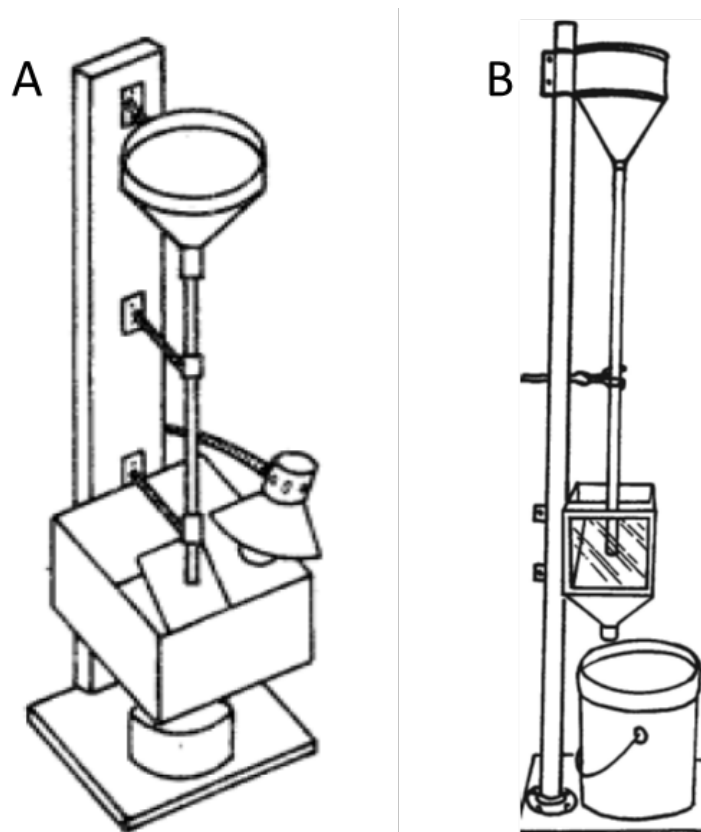


Figura 3-6 Aparato de abrasión ("Método de caída de un abrasivo")

Fuente: A - IRAM 1221/2018. B - Slawson, 2012

Como se puede observar el dispositivo consta de un tubo guía ubicado en posición vertical sobre una base. La parte superior del tubo lleva un reservorio en forma de embudo sobre el que se vierte el material abrasivo. Este embudo presenta un disco obturador con la finalidad de retener el material abrasivo hasta el inicio del ensayo. En la parte inferior del tubo, existe un soporte para colocar la muestra formado por un panel con un ángulo de 45° . En el inicio del ensayo, se retira el disco obturador y, de esta manera, fluye el material sobre la muestra. Para el ensayo se deben respetar la granulometría y las características del material abrasivo. El ensayo finaliza cuando la película del material en estudio presenta una zona de desgaste determinada. La resistencia a la abrasión se expresa en términos del volumen de abrasivo necesario

para el desgaste del espesor del recubrimiento con el abrasivo cayendo desde una altura especificada a través del tubo guía.

Este dispositivo es simple y económico en comparación con otros instrumentos más complejos. Sin embargo, el método es laborioso y requiere mucho tiempo, ya que deben manipularse grandes cantidades de abrasivo debido a la baja velocidad de abrasión, particularmente cuando el material bajo prueba es resistente a la abrasión (Slawson, 2012).

Las normas de referencia de este ensayo son: en Argentina, IRAM 1221/2018 y, en España UNE 135203-2/2010. Según esta última, el método se aplica exclusivamente a pinturas para señalización sin microesferas de premezclado. Es importante destacar que ambas normas tienen diferencias en los tiempos y en las temperaturas de curado de las muestras, previo al ensayo. La norma ASTM D968 también emplea un dispositivo de estas características.

3.4.5. Abrasión por el método *Taber Abraser*

El dispositivo *Taber Abraser*, Figura 3-7, es utilizado para realizar el desgaste por rotación en todo tipo de pinturas. La muestra se aplica sobre un disco de aproximadamente 10 cm de lado o diámetro (según sea de forma cuadrada o circular) que está montado en un plato giratorio y gira a una velocidad fija bajo un disco abrasivo. Estos discos abrasivos dispuestos sobre la probeta soportan pesas que pueden ser seleccionadas en función de la resistencia de la película con el fin de alcanzar un número de ciclos razonable que conduzca al desgaste de la película de espesor conocido. El movimiento rotativo es realizado por la base a la cual se sujeta el panel con la muestra en estudio, Figura 3-8.

Una característica del *Taber Abraser* es que las ruedas atraviesan un círculo completo en la superficie de la muestra. Esto revela la resistencia a la abrasión en todos los ángulos en relación con el grano de la muestra. Se utiliza una aspiradora para eliminar las partículas sueltas generadas durante las pruebas.



Figura 3-7. Dispositivo Taber Abraser

Fuente: <https://www.taberindustries.com>

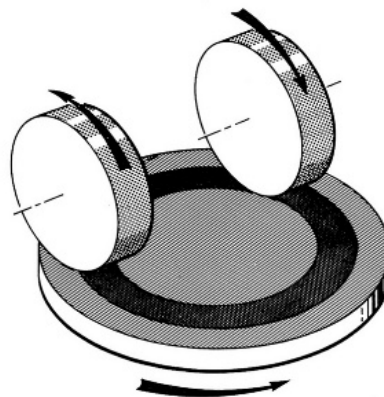


Figura 3-8. Mecanismo de abrasión sobre la muestra

Fuente: <https://www.taberindustries.com>

La resistencia a la abrasión por desgaste se puede expresar en términos del Índice de desgaste definido como la pérdida de peso por número específico de revoluciones (generalmente 1000) bajo una carga específica, y / o en ciclos de desgaste por mil, que es el número de ciclos necesarios para usar a través de un espesor de revestimiento de 1 mil y se informa como el número de revoluciones por mil.

La Norma UNE 135203-1/2010 establece el mecanismo de ensayo aplicado a materiales termoplásticos de aplicación en caliente, plásticos de aplicación en frío y, en general, a todos los materiales que contienen microesferas de vidrio premezcladas.

Debido a que es uno de los ensayos de referencia en diversos artículos consultados y a que se tiene acceso a este equipo, se ha decidido ensayar las muestras utilizadas en la tesis con el fin de tener valores de referencia. En el Capítulo 4, se detalla el procedimiento de análisis.

3.4.6. Comentarios sobre los ensayos normalizados

En el Capítulo anterior, se repasaron conceptos relacionados con las propiedades de las marcas viales y los principales factores que las afectan. En este capítulo, se analizan los distintos dispositivos de ensayo utilizados a nivel mundial con el objeto de valorar la durabilidad de la marca vial y la abrasión de los materiales base.

Los simuladores de desgaste acelerado proporcionan la ventaja de obtener una preclasificación de las marcas viales durante un período de tiempo relativamente corto (inferior a las pruebas de campo). Además, se probaron exhaustivamente y proporcionan procedimientos estándar en Europa para evaluar muestras de marcas viales. Los ensayos de campo son muy utilizados en EEUU mediante el uso de plataformas de prueba NTPEP, cuyo procedimiento se encuentra descrito por AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y tienen en cuenta la variedad de condiciones climáticas en diferentes regiones geográficas de los Estados Unidos. El programa de plataforma de prueba NTPEP ofrece ventajas sobre los programas de prueba de desgaste acelerado que se encuentran en Europa en el sentido de que las muestras de marcas de pavimento se evalúan en el tráfico en vivo en condiciones climáticas típicas que se encuentran dentro de la región de la plataforma de prueba. Sin embargo, el programa de plataforma de prueba NTPEP requiere el uso de carreteras existentes, lo que resulta en cierres periódicos de carriles. La evaluación del programa de plataforma de prueba NTPEP generalmente cubre un período de 2 años, mientras que el protocolo de evaluación de prueba de desgaste acelerado se puede completar en un período de tiempo mucho más corto (Donnell et al., 2009).

De esta forma, se encuentra que los ensayos de campo tienen la principal desventaja que dependen del lugar donde se aplique y, los que simulan el tránsito (simuladores de desgaste), son dispositivos de gran escala que se encuentran en contados sitios a nivel mundial y requieren una gran inversión para su construcción. Estos ensayos dependen de la macrotextura del sustrato y del paso de la rueda. Es importante destacar que ambos métodos requieren un tiempo considerable de ensayo para obtener el resultado (Mouton, 2013).

Por otra parte, se utilizan métodos de abrasión para pinturas en general, que no tienen en cuenta las condiciones específicas de servicio a las que se encuentran sometidos los materiales de demarcación horizontal. Se informa de varios trabajos que indican que algunos ensayos de abrasión no tienen correlación con lo observado en la práctica.

Se encuentran grandes discrepancias en cuanto a los ensayos para evaluar la durabilidad en laboratorio. Esto se justifica en que la durabilidad depende de las condiciones reales durante la aplicación, así como de factores externos como el tipo de superficie de aplicación o las condiciones climáticas de la zona geográfica que, en general, no conciben con las condiciones de ensayo. Pero en este aspecto, el Ministerio de Fomento (2012) resalta que, si bien esta durabilidad no guarda una relación constante con la vida útil de la marca aplicada en la carretera, existe una relación directa entre la durabilidad y la vida útil. De esta forma, es posible comparar dos materiales en unas condiciones determinadas en servicio. Por lo tanto, si se tienen dos marcas viales con distintas durabilidades, a la de mayor durabilidad le corresponde una mayor vida útil. Este es un aspecto relevante y que se toma como premisa en los estudios que se desarrollan en la tesis para cada uno de los aspectos evaluados.

Por consiguiente, resulta necesario desarrollar procedimientos de ensayo, de costo accesible y sencilla ejecución, basados en la utilización de equipos de uso vial, que sean capaces de predecir en laboratorio el comportamiento de las distintas pinturas cuando se vean sometidas al tránsito. Estos procedimientos deben brindar conocimiento del comportamiento de las pinturas o sistemas de señalización vial sometidos al tránsito.

La idea de efectuar este trabajo es una consecuencia del mencionado análisis de las normativas y especificaciones técnicas que establecen los requerimientos a cumplir por la señalización horizontal en nuestro país, centrado en la necesidad de las empresas que aplican el producto y también de las que lo producen para establecer un valor de *performance* en los distintos productos.

En el área vial, relacionable con el ensayo mediante simuladores de desgaste, se encuentra la técnica de los ensayos acelerados de pavimentos (APT), que es una moderna herramienta que permite evaluar estructuralmente los pavimentos y determinar la respuesta y comportamiento de los mismos bajo la aplicación repetida, controlada y acelerada de cargas, en un corto período de tiempo. La ventaja de éstos, radica en que los ensayos son rápidos, confiables, reproducibles, económicos y generalmente pueden llevarse a cabo con una mínima interferencia del tránsito.

Una de las técnicas de APT es el ensayo de “rueda cargada” (WTT: *Wheel Tracking Test*) que se realiza en pavimentos asfálticos para analizar su comportamiento ante el ahuellamiento. El ensayo consiste en someter una probeta de la mezcla bituminosa, al paso de una rueda metálica de 20 cm de diámetro, recubierto con 10 mm a 20 mm de caucho (dureza 80 Shore A), en condiciones determinadas de presión y temperatura, midiéndose periódicamente la profundidad de la deformación producida. El ensayo se realiza a 60 °C. Los resultados obtenidos, para una temperatura y una frecuencia de ensayo dada, manifiestan la deformación acumulada y la velocidad de deformación expresada en mm/min, para diferentes periodos de tiempo. De esta manera, se considera este ensayo relevante debido a que permite acondicionar la temperatura de ensayo y simular el tránsito sobre las marcas viales con la posibilidad de controlar el número de pasadas de ruedas.

Otro de los ensayos considerados es el de “abrasión por vía húmeda” (WTAT: *Wet Track Abrasion Tester*). El mismo se utiliza para la determinación de la resistencia al desgaste húmeda de las lechadas bituminosas utilizadas en la construcción de caminos. Consiste en una manguera de neoprene, aplicada con una determinada presión sobre la superficie de una probeta, con un movimiento de rotación y de traslación durante un tiempo determinado mientras la muestra se encuentra cubierta de agua. Este ensayo permite simular la condición de desgaste con agua inundando la muestra y se considera su efecto tanto en la pintura, evaluando la pérdida de peso como, en la marca vial, con el deterioro de las propiedades esenciales (visibilidad y resistencia al deslizamiento).

Por último, otro de los equipos que se desea implementar para evaluar el desgaste de las pinturas es el denominado Pulimento Acelerado de Áridos. Este equipo indica la resistencia de un árido, sometido a ciclos de pulido, a perder aspereza en su textura superficial, comparándolo con un árido patrón. Cuanto mayor es este coeficiente mayor será la resistencia del árido al pulimento. Es necesario replantear también los procedimientos de trabajo debido a que, el parámetro que se desea conocer es la pérdida de peso por el efecto del tránsito y del agua.

Estos ensayos fueron elegidos debido a que son utilizados para simular el tránsito en distintas condiciones en la evaluación de los materiales de los pavimentos. Además, como se menciona en las pruebas de campo se complementa el uso con la norma ASTM D913/2003 en la cual se presenta una secuencia fotográfica con distintos grados de deterioro. Este aspecto, hace pensar que se pueden realizar evaluaciones de otros factores con ensayos específicos de las condiciones. Por ejemplo, es común observar desprendimiento de la película de pintura en las sendas peatonales. Este efecto es

denominado “grip” en las marcas viales y podría ser estudiado con el ensayo de adhesión por tracción.

Además, por otro lado, interesa la tendencia a ensuciarse de los materiales viales. Con respecto a este último parámetro se retoma el Capítulo 2, donde se plantea que la velocidad de absorción puede ser un criterio importante para evaluar el ensuciamiento de pinturas en la intemperie, ya que a pocas horas la absorción incrusta la suciedad en la película.

De esta manera, se espera confeccionar un procedimiento con ensayos disponibles en los distintos laboratorios viales, o que sean fácilmente adaptables, y que, en conjunto, permitan conocer el comportamiento del material que se desee utilizar en servicio. Debido a las grandes posibilidades de combinación de materiales, se delimita el estudio como se detalla en el próximo capítulo a pinturas acrílicas utilizadas para demarcación en Argentina en los años 2018-2019.

3.5. Metodologías alternativas a implementarse

Se realiza una descripción de cada uno de los métodos mencionados a ser implementados. En cada uno se plantea la idea original del ensayo, los inconvenientes hallados y en el Capítulo 4 se detalla la metodología final de ensayo y sus resultados. Se destaca que, con el objeto de limitar las variables, se unifica la macrotextura y el tipo de sustrato y la forma de colocación del material en cada método, que es definido en cada caso particular.

3.5.1. Implementación del ensayo *Wheel Tracking Test* (WTT)

Se implementa este ensayo para evaluar el comportamiento de los materiales viales con el paso de la rueda. La premisa del ensayo es considerar el comportamiento mediante la simulación del sustrato que se va a utilizar en la obra de forma similar al ensayo realizado en los simuladores de desgaste. Pero, en este caso, se limita la condición a una sola rueda que tiene un movimiento de vaivén sobre la muestra. El estudio del desempeño en este método se plantea mediante la evaluación de las propiedades esenciales (visibilidad y resistencia al deslizamiento) con el paso de la rueda.

El equipo de WTT, Figura 3-9, está conformado por una cabina que permite acondicionar su interior a una temperatura determinada y evaluar el comportamiento frente al

ahuellamiento de probetas de mezclas asfálticas bajo la Norma UNE-EN 12697-22/2008. Las características del equipo WTT se presentan en la Tabla 3-2.

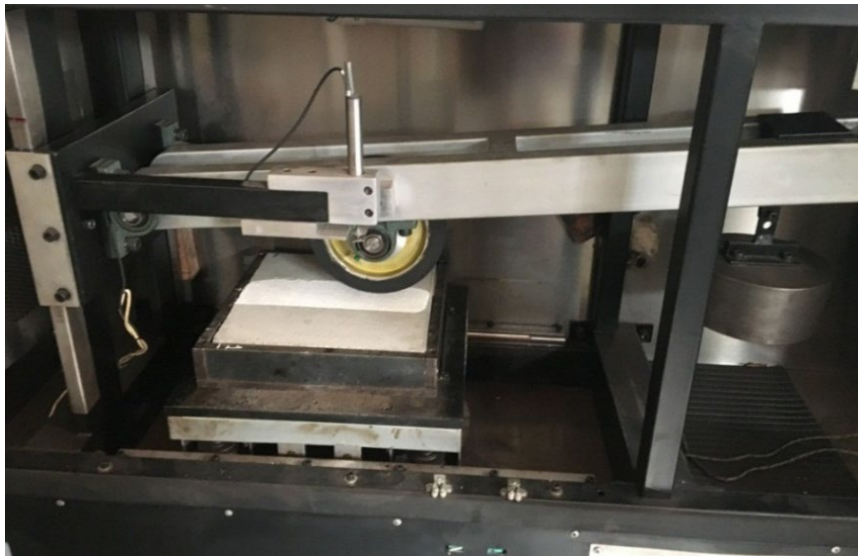


Figura 3-9. Equipo WTT del LEMaC

Fuente: elaboración propia

Tabla 3-2. Característica del equipo WTT

Fuente: elaboración propia

CARACTERÍSTICAS DE LA RUEDA	CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ENSAYO:
<ul style="list-style-type: none"> • Diámetro: 20 cm • Ancho: 5 cm • Espesor 2 cm • Dureza Shore A: 80 • Carga estática: 700 N 	<ul style="list-style-type: none"> • Recorrido: 23 cm • Frecuencia: 26,5 ciclos/minutos • Temperatura de ensayo: 60°C • Largo de brazo: 1 m • Dispositivo de control de temperatura con termocuplas en el recinto • Duración de cada ensayo 10000 ciclos

Inicialmente, se decide utilizar ambos sustratos teniendo la opción de optar por hormigón o mezcla asfáltica. La primera experiencia, se realiza sobre una mezcla asfáltica con un acondicionamiento de la cámara a 60 °C durante 4 horas (mecanismo utilizado para el ensayo de ahuellamiento en mezclas asfálticas). En la Figura 3-10 se presenta la fotografía tomada de la muestra ensayada en estas condiciones donde se observa que la placa de ensayo se deforma y pone en evidencia la necesidad de utilizar otro material como sustrato.



Figura 3-10. Ensayo de pintura aplicada sobre una placa de mezcla asfáltica

Fuente: elaboración propia

Por este motivo, se adopta el hormigón como único material de sustrato. Por otro lado, se presenta la incertidumbre de la temperatura de ensayo, por lo que se decide colocar una muestra en la intemperie, con el objetivo de que reciba los rayos solares. De esta forma, se toman medidas de la temperatura en distintos horarios del día. Esta evaluación se realiza por un período de 1 mes, encontrándose que la temperatura superficial en la marca vial es en promedio durante el día de 40 °C en el mes de octubre (el cual se considera representativo de una situación intermedia a lo largo de un año). Si bien durante el año se transitan diferentes condiciones climáticas, se considera para el ensayo un acondicionamiento a 60 °C durante dos horas. Esto se debe a que es el tiempo necesario para obtener la temperatura de 40 °C en la superficie de la muestra. Otro aspecto considerado para acelerar el desgaste y simular las condiciones en servicio es el del rociado con agua. En este caso, debido a que la cabina cuenta con dispositivos electrónicos interiores para la evaluación de la deformación, no es posible realizarlo y se descarta en la utilización de este equipo.

3.5.2. Implementación del ensayo de abrasión por vía húmeda WTAT

Otro de los equipos que se considera oportuno implementar, es un agitador mecánico, modelo Hobart N-50, utilizado para lechadas asfálticas según la Norma ASTM D3910/1990. El mismo consiste en una máquina de abrasión con un eje vertical de ensayo con un doble movimiento, de rotación y circular de traslación. El extremo inferior del eje vertical contiene un cabezal con una manguera de goma reforzada que roza sobre la probeta sumergida en agua hasta la finalización del ensayo. En este caso, se hace una adaptación de la bandeja de ensayo reemplazando la original por una bandeja

cuadrada con un recorte en una esquina. En la Figura 3-11 se puede observar el equipo utilizado en estas experiencias.



Figura 3-11. Equipo WTAT del LEMaC

Fuente: elaboración propia

De esta forma, en la búsqueda de metodologías de ensayo que permitan evaluar el comportamiento de los recubrimientos viales ante el efecto del tránsito y del agua, se implementa el método de abrasión por vía húmeda. En el Capítulo 4, se desarrolla en detalle la metodología de ensayo utilizada para la evaluación de las marcas viales.

3.5.3. Implementación del ensayo de Pulimento Acelerado

Como se ha planteado anteriormente, se espera lograr un procedimiento de ensayo lo más sencillo y económico posible, que pueda basarse en equipos de uso común y así facilitar la normalización y la generalización de su utilización en otros laboratorios de control de calidad, universidades y centros.

Por este motivo, se emplea el equipo denominado de Pulimento Acelerado de Áridos y, a partir de ahora se denomina Pulimento Acelerado, que se utiliza para caracterizar la calidad de los áridos en las capas de rodadura y se encuentra enmarcado en la Norma IRAM 1543/2002. Se espera que el mismo pueda reproducir de forma controlada y en un periodo razonable de tiempo, el desgaste por abrasión en pinturas de demarcación

vial cuando son sometidas a la acción del tránsito y la lluvia. En la Figura 3-12, se muestra el equipo utilizado en el LEMaC, en la cual se observa que presenta un mecanismo denominado “rueda de ensayo”, sobre cuya periferia lisa y plana se fijan 14 probetas para conformar una superficie continua de rodadura.



Figura 3-12. Equipo de Pulimento Acelerado de Áridos del LEMaC

Fuente: elaboración propia

Además, contiene un sistema para hacer girar la rueda de caucho maciza de ensayo alrededor de su eje a una velocidad de 343 vueltas/min. Con la ayuda de un mecanismo del equipo, la superficie de la rueda de caucho apoya sobre las probetas de la rueda de ensayo con una carga total de 725 ± 10 N. Se utiliza el dispositivo disponible para la alimentación del agua durante el ensayo, que consiste en un recipiente cilíndrico transparente con boca ancha, provisto de una tapa sifónica. Dicho recipiente va situado en un soporte superior y a una altura constante, respecto al punto de entrada del agua en la zona de alimentación sobre la rueda de ensayo. El agua, desde el depósito, desemboca en un compartimento solidario con la rampa del abrasivo (no utilizado en este caso).

En la primera fase del estudio, se llevaron a cabo modificaciones al procedimiento utilizado en Áridos, para adaptarlo al análisis de desgaste en pinturas. Para ello, se define un procedimiento de fabricación y preparación de las probetas. De esta forma, inicialmente se realizan diferentes pruebas con distintos productos para generar el sustrato de las pinturas. Para la confección de éstos, se utilizan los moldes metálicos disponibles en el LEMaC que se muestran en la Figura 3-13. Todas las probetas conformadas, tienen la superficie curvada según el arco de círculo de 406 mm a lo largo de su dimensión mayor y en la dirección más corta tienen la superficie plana.



Figura 3-13. Moldes utilizados para el ensayo de Pulimento Acelerado

Fuente: elaboración propia

Para iniciar la experiencia se realizaron 12 (doce) sustratos donde se combinaron resinas epoxídicas en gel con arena (sustrato A) cuyo proceso se puede observar en la Figura 3-14.



Figura 3-14. Confección de las probetas con sustrato A

Fuente: elaboración propia

También se realizaron 7 (siete) sustratos con fibra de vidrio, resina y catalizador (sustrato B). Como se muestra en la Figura 3-15, es un proceso laborioso y de tiempo excesivo debido a que se ha tenido que realizar en sucesivas capas. Además, se encontró con el inconveniente de que la parte superior del molde (inferior del ensayo) presenta imperfecciones, por lo que se decidió nivelar la superficie con una resina en gel para darle una terminación final.

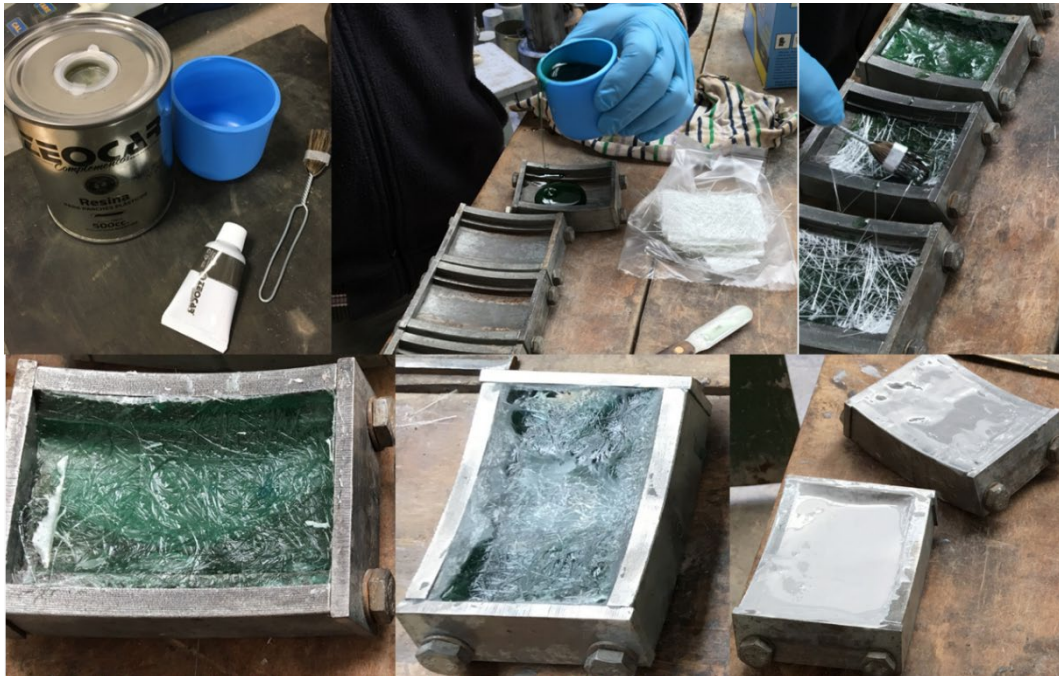


Figura 3-15. Confección de las muestras con sustrato B

Fuente: elaboración propia

Por último, se realizaron 14 (catorce) sustratos con resinas epoxídicas en gel sin el agregado de otro material (denominadas Sustrato C) cuyo proceso se presenta en la Figura 3-16.



Figura 3-16. Confección de las muestras con sustrato C

Fuente: elaboración propia

Como segunda medida, fue necesario determinar el mecanismo de ensayo. Para ello se registró el peso de los sustratos y se aplicaron muestras de pintura con pincel sobre los mismos. En las pruebas iniciales no se mantuvieron iguales condiciones de curado en todas las muestras. En base a esto, se decidió en pruebas posteriores establecer como período de curado la colocación en una cámara a 40 °C por un período de 7 días con la finalidad de ajustarse a las normas del ensayo *Taber Abraser* y de unificar criterios. Luego del período de curado, y previo al ensayo, se pesaron nuevamente las probetas y se colocaron en el dispositivo de ensayo abriendo la válvula que permite que el agua caiga sobre las probetas. Inicialmente, se realizaron ensayos por períodos de 1 hora, se retiraban las probetas, se secaban y pesaban. Este procedimiento resulta complicado, laborioso y sin grandes beneficios ya que se debe asegurar de volver a colocar las probetas en las mismas condiciones para asegurar que las mismas continúen siendo sometidas al desgaste en la misma zona. De esta forma, se decidió realizar 4 horas de ensayo en las pruebas posteriores para comparar los valores de todas las muestras.

A continuación, en las Figuras 3-17 a 3-19 se presentan las imágenes de las probetas con los distintos sustratos luego del ensayo.



Figura 3-17. Muestras con sustrato A luego del ensayo

Fuente: elaboración propia

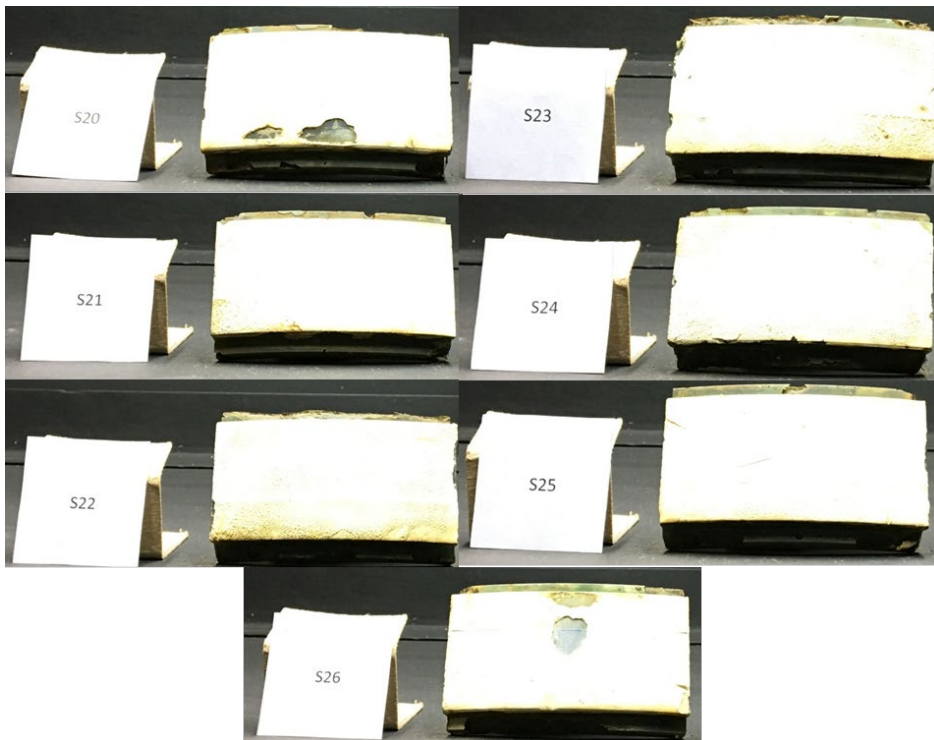


Figura 3-18. Muestras con sustrato B luego del ensayo

Fuente: elaboración propia

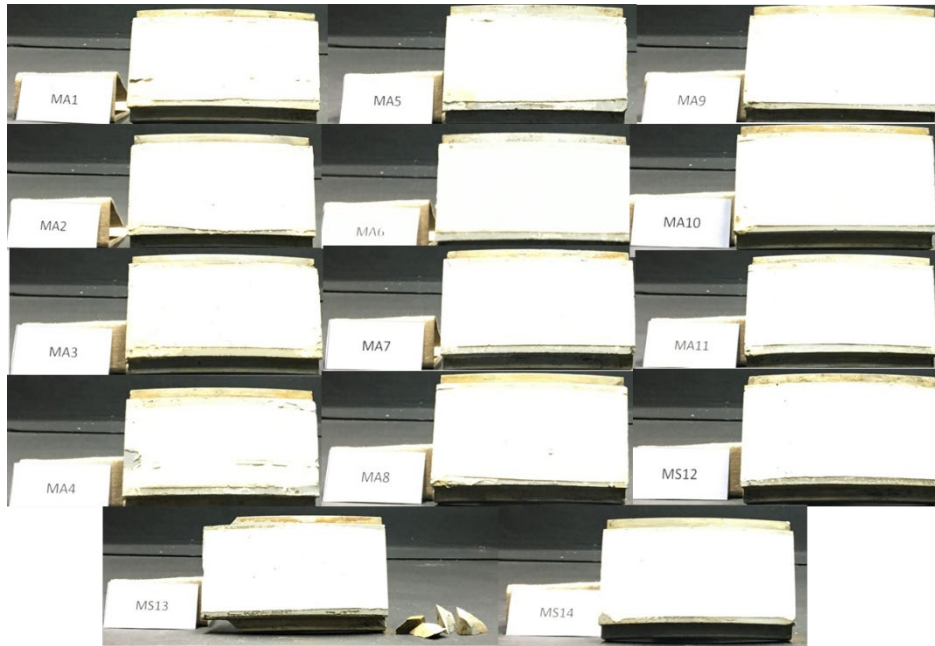


Figura 3-19. Muestras con sustrato C luego del ensayo

Fuente: elaboración propia

Por otro lado, con respecto al comportamiento de los sustratos, se destaca que:

- Con el sustrato A se generaron 12 probetas de las cuales 7 resultaron frágiles y se quebraron durante el primer ensayo (probetas A1, A6, A8, A9, S10, S11 y S12). Es decir, que se obtuvieron solo 5 resultados del ensayo.
- Con el sustrato B se pintaron las probetas y como se observa en la Figura 3-18 se desprendió pintura. Se debería evaluar el motivo de este efecto, pero debido a que el procedimiento de elaboración resulta muy laborioso se decidió descartar el sustrato.
- Con el sustrato C se generaron 14 probetas de las cuales sólo resultaron frágiles 3 probetas (MA1, MA4 y MS13).

En base a lo analizado se resalta que el sustrato con mejor comportamiento es el denominado C, conformado con resinas epoxídicas en gel. Además, su materialización no resulta laboriosa y se han demostrado menos frágiles en el ensayo. Los detalles de la metodología se presentan en el Capítulo 4, en el cual se explica el procedimiento de adaptación definido para el ensayo con la finalidad de obtener la pérdida de peso y los resultados obtenidos.

3.5.4. Ensayos complementarios

Es necesario buscar la alternativa para evaluar algunos aspectos secundarios, pero tan importantes como la durabilidad. Entre estos aspectos se puede considerar el *grip* y el ensuciamiento. Por ejemplo, en el caso del primero si la pintura se desprende del sustrato no interesa que tenga una excelente durabilidad. Con respecto al ensuciamiento, si una pintura tiene facilidad en la adherencia de las partículas de polvo y se ensucia fácilmente va a perder características de visibilidad. Así, como se menciona en el Capítulo 2, existen criterios relacionados con la velocidad de absorción de los recubrimientos en las primeras horas de sumergidos en agua.

En base a esta observación, en el Capítulo 4, se realiza una evaluación de la absorción de las películas de pintura, y también se considera la relación con el brillo de pintura con el fin de obtener parámetros que permitan conocer *a priori* las características de la película de pintura relativa a la posibilidad de ensuciarse. A su vez, se detalla el procedimiento seguido con el ensayo de tensión por adhesión con el fin de detectar algún inconveniente con los sustratos utilizados en servicio (pavimento de hormigón o mezcla asfáltica).

Referencias

ASDRUBALI, F., BURATTI, C., MORETTI, E., D'ALESSANDRO, F., SCHIAVONI, S., "Assessment of the performance of road markings in urban areas: the outcomes of the CIVITAS Renaissance Project", *The Open Transportation Journal*, 7(1), 2013.

AASHTOa, "National Transportation Product Evaluation Program: Project Workplan for the Field Evaluation of Pavement Marking Materials", Washington, DC, 2004.

AASHTOb, "National Transportation Product Evaluation Program NTPEP Best Practices Manual", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2004.

ASTM, "ASTM D3910: Standard Practices for Design, Testing, and Construction of Slurry Seal", 1990.

ASTM, "ASTM D713: Standard Practice for Conducting Road Service Tests on Fluid Traffic Marking Materials", 1990.

ASTM, "ASTM D 6372: Standard Practice for Design, Testing, and Construction of Microsurfacing", 1999.

ASTM, "ASTM D913: Standard Practice for Evaluating Degree of Pavement Marking Line Wear", 2009.

BABIĆ, D., BURGHARDT, T., BABIĆ, D., "Application and characteristics of waterborne road marking paint", *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 5(2), 150-169, 2015.

BURGHARDT, T. E., BABIĆ, D., BABIĆ, D., "Application of waterborne road marking paint in Croatia: Two years of road exposure", In *International Conference on Traffic and Transport Engineering*. Belgrade. Srbija, 2016.

CALAVIA D., "Demarcación horizontal – Seguridad vial – La visibilidad de las marcas viales – Aspectos fotométricos – Retrorreflexión", *Revista Carreteras*, Argentina, n 145, pp. 47 a 55, 1995.

CALAVIA D., "La durabilidad de la demarcación horizontal. Experiencia en la Unión Europea", Comunicación presentada en el Pre XV Congreso de Vialidad y Tránsito, Ciudad de Buenos Aires, Argentina, 2007.

CARLSON, P., PARK, E. S., PIKE, A., PORTER, R. J., MILES, J., BOULANGER, B., ... EALDING, W., "Pavement marking demonstration projects: state of Alaska and state of Tennessee", (No. FHWA-HRT-12-048), United States, Federal Highway Administration, Office of Safety Research and Development, 2013.

COTTRELL, B. H., HANSON, R. A., "Determining the effectiveness of pavement marking materials" (No. FHWA/VTRC 01-R9), Virginia Transportation Research Council, 2001.
DE WITT, A., SMITH, R., VISSER, A., "Durability and cost effectiveness of road marking paint", SATC2000, 2000.

DONNELL, E., CHEHAB, G., TANG, X., SCHALL, D., "Exploratory analysis of accelerated wear testing to evaluate performance of pavement markings". *Transportation research record*, 2107(1), 76-84, 2009.

GREYSON, E., METLA, D., GALLAGHER, J., SCHALL, D. "Modernizing and Streamlining Waterborne Traffic Paint Specifications", Transportation Research Record, 2612(1), 104-112, 2017.

IRAM, "Norma IRAM 1221: Recubrimiento para demarcación de pavimentos. Pintura vial retrorreflectante y no retrorreflectante", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina, 2018.

IRAM, "Norma IRAM 1543: Agregados. Determinación del coeficiente de pulimento acelerado.", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina, 2002.

ISSA, International Slurry Surfacing Association - Boletín técnico N°109.

MIGLETZ, J., FISH, J. K., GRAHAM, J. L., "Roadway delineation practices handbook", (No. FHWA-SA-93-001), United States, Federal Highway Administration, 1994.

MIGLETZ, J., GRAHAM, J., HARWOOD, D., BAUER, K. "Service Life of Durable Pavement Markings", Transportation Research Record 1749, TRB, National Research Council, Washington D.C., 13-21, 2001.

MINISTERIO DE FOMENTO, "Guía para el proyecto y ejecución de obras de señalización horizontal", Editorial Centro de Publicaciones, secretaria general Técnica, Ministerio de Fomento (ISBN 978-84-498-0926-2), España, 2012.

MIZERA, C. M., "Improving pavement marking performance through contrasting new methods to quantify marking presence and increasing installation efficiencies through an evaluation of prototype bead guns", 2008.

MOUTON, Y, "Organic materials in civil engineering", John Wiley & Sons, 2013.

OZELIM, L., TUROCHY, R. E., "Modeling retroreflectivity performance of thermoplastic pavement markings in Alabama", Journal of Transportation Engineering, 140(6), 2014.

PIKE, A. & SONGCHITRUKSA, P., "Predicting pavement marking service life with transverse test deck data". Transportation Research Record, 2482(1), 16-22, 2015.

SASIDHARAN, L., KARWA, V., & DONNELL, E., "Use of pavement marking degradation models to develop a pavement marking management system", Public Works Management & Policy, 14(2), 148-173, 2009.

SATHYANARAYANAN, S., SHANKAR, V., DONNELL, E. T. "Pavement marking retroreflectivity inspection data: A Weibull analysis", Transportation Research Record, 2055(1), 63-70, 2008.

SCHWEIGGER, E., "Manual de pinturas y recubrimientos plásticos", Ediciones Díaz de santos, 2005.

SLAWSON D. K., "Abrasion Resistance," in Paint and Coating Testing Manual: 15th. Edition of the Gardner-Sward Handbook, ed. J. Koleske (West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012), 615-623, 2012. <https://doi.org/10.1520/MNL12228M>.

THAMIZHARASAN, A., SARASUA, W., CLARKE, D., & DAVIS, W., "A methodology for estimating the lifecycle of interstate highway pavement marking retroreflectivity", In 82nd

Annual Meeting of the Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC, 2003.

Turntable road-marking test system (RPA) [sitio]. Disponible en: <https://www.bast.de/BASt_2017/EN/Traffic_Engineering/Technology/RPA.html;jsessionid=629B1672A4541B9D864E677EEDC771E0.live11294?nn=1497202>, acceso 26 abril 2021.

TXDOT, “DMS-8200 Traffic Paint”, Texas Department of Transportation, 2017. (Consultado en web marzo de 2017: https://ftp.txdot.gov/pub/txdot-info/cst/DMS/8000_series/pdfs/8200.pdf).

UNE, “Norma UNE 135203-1: Equipamiento para la señalización vial. Señalización horizontal. Materiales. Ensayos de abrasión en laboratorio. Parte 1: Determinación de la resistencia a la abrasión mediante el método Taber”, 2010.

UNE, “Norma UNE 135203-2: Equipamiento para la señalización vial. Señalización horizontal. Materiales. Ensayos de abrasión en laboratorio. Parte 2: Determinación de la resistencia a la abrasión mediante el método de caída de un abrasivo”, 2010.

UNE, “Norma UNE-EN 1824: Materiales para señalización vial horizontal. Pruebas de campo”, 2012.

UNE, “Norma UNE-EN 12697-22: Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 22: Ensayo de rodadura”, 2008.

UNE, “Norma UNE-EN 13197: “Materiales para señalización vial horizontal. Simulador de desgaste. Mesa giratoria”, 2012.

Zhang, Y., & Wu, D., “Methodologies to predict service lives of pavement marking materials”, In Journal of the Transportation Research Forum (Vol. 45, No. 3), 2010.

Zhang, Y., Ge H., Pike A., Carlson P., “Development of Field Performance Evaluation Tools and Program for Pavement Marking Materials: Technical Report”. Report No. FHWA/TX-11/0-5548-10-5548-1. Texas Transportation Institute, College Station, 2011.

4 - Caracterización de los materiales, metodología y discusión de resultados

4.1 Introducción

En el Capítulo 1 y en el Capítulo 3 se pone en evidencia que es necesario realizar un análisis más exhaustivo de los materiales para poder caracterizarlos y conocer su comportamiento en condiciones de servicio. Por este motivo, en este capítulo, se busca determinar si las metodologías implementadas en la tesis permiten evaluar algún aspecto del comportamiento en servicio y ensayos complementarios que permitan integrar la información sobre el revestimiento. De esta manera, luego de la caracterización de los materiales, se analizan las metodologías y resultados de los ensayos de durabilidad, de resistencia a la abrasión y de tensión por adhesión.

4.2 Materiales utilizados para conformar los recubrimientos en la tesis

Como se menciona en el Capítulo 2 para la materialización de los ensayos, se utilizan tres pinturas acrílicas base acuosa y se compara su comportamiento con una pintura acrílica base solvente. Todas las pinturas que se utilizan son de color blanco. A continuación, se describe la denominación que se utiliza para las pinturas junto a las características enunciadas por los fabricantes:

A1: Pintura acrílica base acuosa de densidad $1,70 \text{ g/cm}^3$ y compuesta por una emulsión acrílica acuosa, dióxido de titanio, agua amoniacal, metanol, etanol y cargas minerales naturales y sintéticas a base de carbonatos silicatos y óxidos. Estos tres elementos últimos en un porcentaje de contenido máximo de 34 %.

A2: Pintura acrílica base acuosa de densidad $1,77 \text{ g/cm}^3$ y contenido de orgánicos volátiles (VOC) de 1,39 % en peso.

A3: Pintura acrílica base acuosa de densidad $1,73 \text{ g/cm}^3$ y contenido de orgánicos volátiles (VOC) de 1,60 % en peso.

S1: Pintura base solvente de densidad $1,44 \text{ g/cm}^3$ y compuesta por resinas acrílicas modificadas, dióxido de titanio, diátomea, calizas, acetona, tolueno y destilados del petróleo.

En los párrafos siguientes se describen las características de los materiales de postmezclado utilizados. Como se menciona en los capítulos anteriores, las microesferas de premezcla son las que se incorporan dentro de la masa de pintura y las de siembra se incorporan sobre la pintura aplicada. De acuerdo con la Norma IRAM 1225/2014 es necesario realizar la curva granulométrica de las microesferas para caracterizarlas. En la Figura 4-1 se muestra la foto de la tamizadora automática del LEMaC donde se fueron colocando la serie de tamices correspondiente para cada ensayo.



Figura 4-1. Tamizadora automática del LEMaC

Fuente: elaboración propia

Las microesferas utilizadas para conformar los recubrimientos retrorreflectantes son:

Microesferas de Premezcla (P): Las microesferas de premezclado utilizadas, corresponden a las microesferas de vidrio tipo P-93, Figura 4-2.



Figura 4-2. Microesferas de premezcla P

Fuente: elaboración propia

Se realiza la granulometría de las microesferas de acuerdo con lo enunciado en la norma IRAM 1225/2014 con la tamizadora presentada. La curva granulométrica obtenida nos demuestra que las microesferas son tipo P1 debido a que la curva obtenida se encuentra entre las curvas límites para este tipo, Figura 4-3.

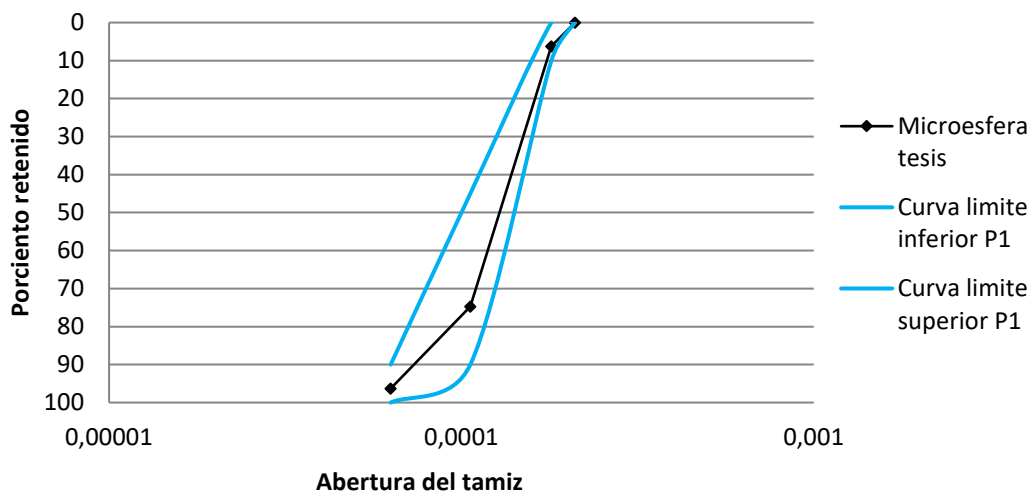


Figura 4-3. Granulometría de las microesferas de premezcla P

Fuente: elaboración propia

Microesferas de Siembra (Drop-on): en este caso, se diferencian las microesferas utilizadas para la pintura base solvente (S1) y las que son afines a las pinturas base acuosa (A1, A2, y A3). Comenzamos con las características de las primeras:

- **TAF-S2:** Se trata de microesferas H-85 que presentan un tratamiento de adherencia y flotación (TAF) para pinturas base solvente. En la Figura 4-4 se presentan las imágenes de las utilizadas para conformar los recubrimientos.



Figura 4-4. Microesferas de sembrado TAF-S2

Fuente: elaboración propia

Se realiza la granulometría de las microesferas de acuerdo con lo enunciado en la norma IRAM 1225/2014 con la tamizadora presentada. La curva granulométrica obtenida nos demuestra que las microesferas son tipo S2 debido a que la curva obtenida se encuentra entre las curvas límites para este tipo, Figura 4-5.

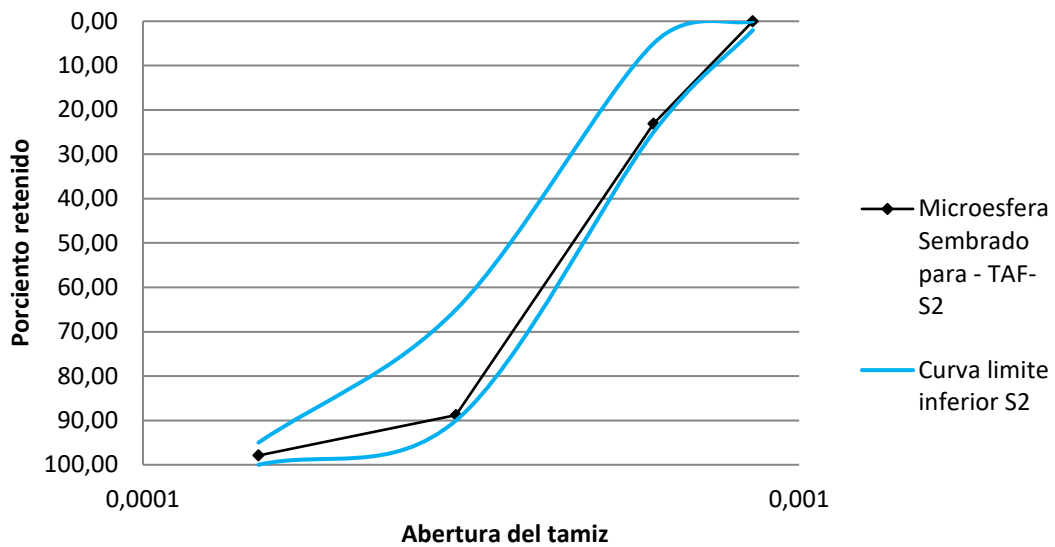


Figura 4-5. Granulometría de las microesferas TAF-S2

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 4-1 se presentan las principales características establecidas en su ficha técnica.

Tabla 4-1. Características técnicas de las microesferas TAF-S2 (H-85 TAF) Fuente: <https://www.glassbeads.com.ar> (adaptación propia)

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Tratamiento superficial	Adherencia Y Flotación
Índice de Refracción Clase A	$\geq 1,50$
Microesferas defectuosas	≤ 15
Esfericidad ASTM-D-1155-53	Perfectas $\geq 70\%$
Esfericidad Microscopio	Perfectas $\geq 80\%$
Resistencia a los Agentes Químicos: Agua	< 10 ml de HCl 0,1 N
Resistencia a los Agentes Químicos: Ácidos	Cumple con la norma
Resistencia a los Agentes Químicos: Solución 1N de CaCl ₂	Cumple con la norma

- **ECH-20-WBP:** son microesferas con un tratamiento de Adherencia y Flotación (WBP) para pinturas base acuosa, Figura 4-6. La naturaleza del vidrio utilizado es Sílico Sódico Cálculo.



Figura 4-6. Microesferas de sembrado ECH-20-WBP

Fuente: elaboración propia

Se realiza las series de tamices de la Norma IRAM 1225/2014 pero, debido a que estas microesferas son importadas, no están dentro de las curvas límites de la misma. En la Tabla 4-2 se indica el porcentaje retenido en los tamices de las curvas límites de acuerdo con la Norma UNE 1423/2012.

Tabla 4-2 Granulometría de las microesferas ECH-20-WBP
Fuente: <http://www.marcasviales-sa.es> (adaptación propia)

TAMIZ	% RETENIDO ACUMULADO MÍNIMO	% RETENIDO ACUMULADO MÁXIMO
1400 µm	0	2
1180µm	0	10
1000 µm	0	20
850 µm	10	30
600 µm	20	60
355 µm	50	90
212 µm	70	100
125 µm	95	100

En la Tabla 4-3 se presentan las principales características establecidas por la empresa que distribuye el producto.

Tabla 4-3. Características de las microesferas ECH-20-WBP
Fuente: <http://www.marcasviales-sa.es> (adaptación propia)

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Tratamiento superficial	Adherencia
Índice de Refracción Clase A	≥ 1,50
% esferas buenas < 1000 micras	≥ 82
Porcentaje de grano < 1000 micras	≤ 3 %
% esferas buenas ≥ 1000 micras	≥ 72
Porcentaje de grano ≥ 1000 micras	<= 3 %
Resistencia al agua, ácido clorhídrico y cloruro cálcico	Sin alteraciones superficiales
Resistencia al sulfuro sódico	Sin oscurecimiento

4.3 Ensayos de caracterización y determinación de las propiedades de las pinturas

En el punto 4.2, se detallan las propiedades obtenidas de la información técnica de cada una de las pinturas. En el caso de las pinturas de demarcación, no se ha encontrado una forma de caracterizar los materiales como sucede, por ejemplo, en los asfaltos. Es un tema que resulta de interés, debido a que existe gran variedad de materiales base, pero este aspecto

queda fuera de los alcances planteados. Sin embargo, es importante, conocer otros aspectos para poder compararlas y relacionar con su comportamiento frente a los ensayos estudiados en la tesis. Por este motivo, se realizan una serie de ensayos para reunir información sobre cada una de las pinturas.

Uno de los ensayos elegidos es la Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier, de acuerdo con la recomendación de Greyson et al. (2019) expresada en el Capítulo 3, para analizar la composición de las pinturas utilizadas en la tesis. Relacionado a esto y con la finalidad de observar diferencias en los materiales, se analizan, mediante microscopía óptica y electrónica de barrido, las películas de pintura. Asimismo, es importante determinar propiedades relacionadas con el aspecto visual, como el brillo y tipologías de falla de la película seca. Por último, se realizan los ensayos de resistencia al ataque químico.

4.3.1 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

Se realiza el ensayo de Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) con la utilización del equipo IRAffinity del CITEMA, Figura 4-7.



Figura 4-7. Izq.: Muestra utilizada; Der: Equipo FTIR del CITEMA

Fuente: elaboración propia

El objeto de este ensayo es identificar y analizar la composición de las pinturas utilizadas en la tesis. Las bandas del espectro FTIR obtenido son características de determinados grupos funcionales y su estudio permite identificar la especie química correspondiente a la muestra. Es decir, que esta técnica de análisis superficial aporta información de la composición del material sobre la que se está haciendo el análisis.

La Figura 4-8, presenta los espectros FTIR de cada una de las pinturas evaluadas en estado de película seca. De los espectros obtenidos, se comparan los valores de longitud de onda de cada uno, encontrando que se asemejan bastante en su composición. Se deduce que todas las muestras son conformadas con resinas acrílicas debido a que presentan los picos característicos de la misma (Alonso, 2016; Caddy, 2001). Se observa que las pinturas A1 y S1 tienen pequeños picos en la zona superior a los 3000 cm^{-1} , característicos de resinas acrílicas estirenadas (Chicago Society for Coatings Technology, 1980). Con respecto a las pinturas A2 y A3 se deduce que las mismas son tipo acrílicas puras debido a que no presentan dichas vibraciones.

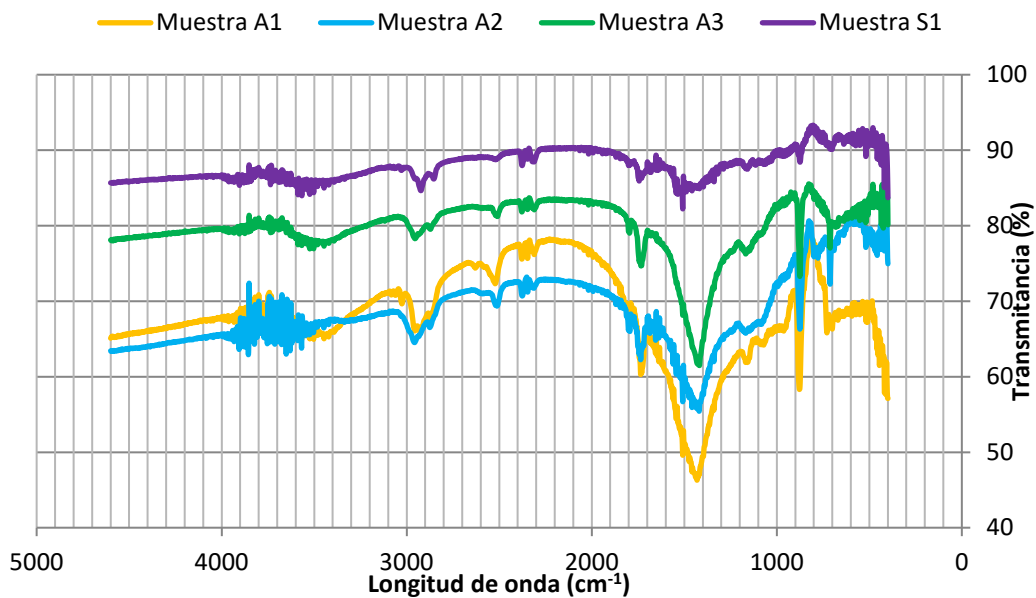


Figura 4-8. Espectros de las pinturas utilizadas

Fuente: elaboración propia

Al comparar los espectros de los pigmentos se observa que las tres pinturas base acuosa presentan picos en 1423 cm^{-1} , 876 cm^{-1} y 318 cm^{-1} que corresponden a los picos primarios en el espectro IR del carbonato de calcio, como se muestra en la Figura 4-9.

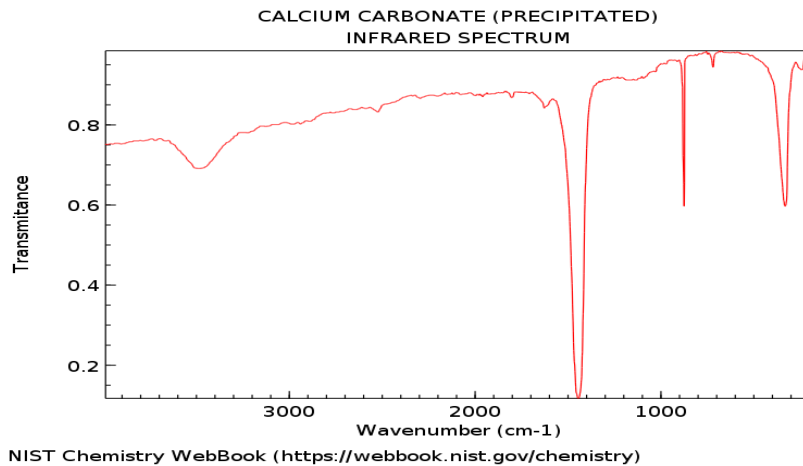


Figura 4-9. Espectros de carbonato de calcio

Fuente: <https://webbook.nist.gov/chemistry/>

De esta forma se deduce que las tres pinturas base acuosa tienen contenidos de carbonato de calcio en su composición, ya que se aprecian vibraciones similares. La región de 700 cm^{-1} a 400 cm^{-1} corresponde al dióxido de titanio.

4.3.2 Contenido de sólidos en masa

El material no volátil o contenido de sólidos nos brinda información sobre la cantidad de material que queda depositado una vez que ha endurecido la película de pintura, es decir, el residuo de pintura que queda después del proceso de secado total de la película. Como se menciona en la descripción de los materiales en el Capítulo 2, una pintura está constituida por una parte volátil (solvente) que permite fluidificar sus componentes para poder ser aplicados y una parte no volátil (resina y pigmentos). Estos solventes se evaporan durante el proceso de secado salvo cuando estos son reactivos y quedan formando parte de la película endurecida.

La determinación del contenido de sólidos de las muestras de pintura se realiza según el anexo A de la norma BS EN 12802/2011. El principio considerado en el método es que los componentes volátiles de la pintura se evaporan a 105°C . Para realizar el ensayo, en primer lugar, se pesa una cápsula tipo Petri P1 conforme a norma, y se incorpora una cantidad de pintura obteniéndose el valor P2. Luego, se coloca en estufa de convección a una temperatura de 105°C durante 3 horas. Finalmente, se enfría a temperatura ambiente en un desecador y se pesa, P3. En la Figura 4-10 se presentan imágenes del proceso realizado.



Figura 4-10. Determinación del material no volátil en masa

Fuente: elaboración propia

De esta forma, se obtiene el material no volátil S en % como muestra la ecuación 4-1. Los valores se presentan en la tabla 4-4.

$$S(\%) = \frac{p3-p1}{p2-p1} \cdot 100 \quad (4-1)$$

Tabla 4-4. Determinación del contenido de sólidos Fuente: Elaboración propia

MUESTRAS	$p1$ (g)	$p2$ (g)	$p3$ (g)	$S(\%)$
A1	35,6945	37,7243	37,2068	74,5
A2	31,6391	33,6644	33,3108	82,5
A3	29,7839	31,8148	31,4531	82,2
S1	60,0343	62,08	61,5779	75,5

Como se puede apreciar, las pinturas A1 y S1 presentan contenidos similares de sólidos y más bajo que las pinturas A2 y A3.

4.3.3 Durómetro de penetración Buchholdz

La determinación de la dureza de un *film* de pintura seca es una medida del nivel de progreso en el proceso de secado o curado. Es una propiedad que indica de forma precisa si la pintura ha alcanzado sus características finales (Carbonell, 2011).

El durómetro Buchholz es un dispositivo de ensayo de penetración, mediante el cual se evalúa la longitud de la huella que deja este aparato después de colocar su cabezal sobre la superficie de un revestimiento durante 30 segundos. Luego, mediante una lupa con escala

graduada se mide la longitud de la huella que ha dejado el durómetro y se calcula la resistencia a la penetración según la Ecuación 4-2, expresada en unidades Buchholz.

$$\text{Resistencia a la Penetración Buchholz} = 100 \text{ mm/Long de Huella} \quad (4-2)$$

La Figura 4-11, muestra el equipo utilizado y la forma del cabezal de penetración. Cuanto mayor es la huella que deja el equipo de penetración Buchholz, menor es la dureza del recubrimiento.



Figura 4-11. Durómetro Buchholz del INIFTA

Fuente: elaboración propia

Se aplican las 4 muestras de pintura sobre chapas cincadas, Figura 4-12. Para ello se utiliza el dispositivo de aplicación con manija que se presenta en el Anexo 1. Las muestras se acondicionan en un ambiente a 25 °C durante 30 días.



Figura 4-12. Preparación de las muestras para ensayos de caracterización

Fuente: elaboración propia

Luego se realiza el ensayo con el equipo mencionado obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 4-5. De la misma, se observa que la película de la pintura base solvente es más resistente a la penetración y, por lo tanto, más dura mediante el método Buchholdz que las películas base acuosa. Asimismo, se destaca que la pintura A3 es la que presenta una película más blanda.

Tabla 4-5. Valores de Resistencia a la penetración Buchholz

Fuente: elaboración propia

MUESTRAS	VALOR PROMEDIO [mm]	Ra (resistencia a la penetración Buchholz)
A1	2	50,0
A2	1,95	51,3
A3	2,3	43,5
S1	1,7	58,8

4.3.4 Propiedades visuales

La opacidad, el color y el brillo de las superficies son percepciones subjetivas por la interacción de la luz con la película de las pinturas, Figura 4-13. Estas propiedades, en conjunción con la forma de la superficie pintada, combinan aspectos estéticos y funcionales.

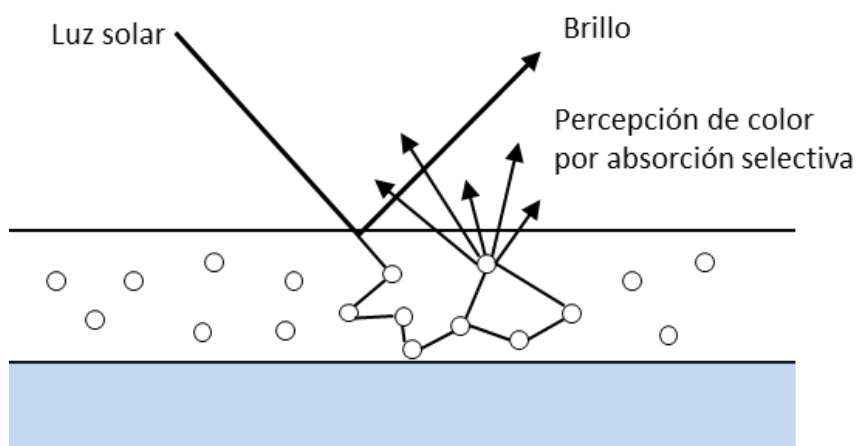


Figura 4-13. Diferencia entre color y brillo

Fuente: Giudice, 2009 (adaptación propia)

El color es el resultado de un efecto fisiológico debido a la interacción de la luz, en el interior de la película, con sus componentes. En cambio, el brillo es una impresión sensorial causada por la reflexión de la luz sobre la superficie (Giudice, 2009).

Otro factor, que se considera importante en estas propiedades, es el aspecto visual mediante toma de fotografías ya que permite comparar el comportamiento de los distintos materiales mediante una forma más objetiva que una descripción textual. Debido a que se considera un aspecto relevante para comparación de los resultados en varios ensayos, en el Anexo A se detallan las consideraciones para la confección de las cámaras de inspección visual.

4.3.4.1 Color

El color es un parámetro importante en las pinturas de demarcación vial debido a que, en general, también brinda información al conductor sobre el uso de la carretera. Por ejemplo, se conoce que el blanco se utiliza en el caso de marcas longitudinales para separar generalmente corrientes de tránsito en el mismo sentido, para marcas transversales, y para marcas especiales en caso de que corresponda (isletas, aproximaciones a obstrucciones). Y, por otro lado, el color amarillo se utiliza en marcas longitudinales para separar exclusivamente corrientes de tránsito en sentido opuesto y para marcas especiales donde corresponda (DNV, 2012). También se utilizan otros colores con distintos significados. Por este motivo, en las normas se establecen tablas con tolerancias de cada espacio de color.

Este aspecto queda por fuera del alcance de la tesis debido a que los ensayos son realizados en color blanco y no es un aspecto de estudio en el deterioro de los materiales. De forma similar ocurre con la evaluación del ensuciamiento que se analiza más adelante y se considera apropiada la comparación de imágenes. Teniendo en cuenta que la evaluación del color se realiza en puntos singulares.

4.3.4.2 Brillo

El mecanismo de medida consiste en cuantificar fotoeléctricamente la intensidad de un rayo de luz reflejado por la superficie en examen, en condiciones tales que el ángulo de medida es siempre igual al de incidencia. La selección del ángulo de incidencia depende del brillo de la superficie a medir. En el caso en estudio, para establecer una mejor correlación con la observación visual, se considera un ángulo de incidencia y de reflexión de 60°. El brillo de una superficie dada, determinado con ángulos diferentes, proporciona valores distintos.

Como referencia para las películas de pinturas, los valores proporcionados con un ángulo de incidencia y de reflexión de 60°, se clasifican según la siguiente escala: 0-15 mate; 16-25 semimate; 26-50 poco brillante; 51-70 brillante y 71-100 muy brillante (Giudice, 2009).

Para evaluar este parámetro se utilizan las 4 probetas preparadas como se comenta en el punto anterior para la evaluación de la dureza Buchholz pero, en este caso, se utiliza el equipo ByK del INIFTA, Figura 4-14.



Figura 4-14 Equipo ByK utilizado del INIFTA

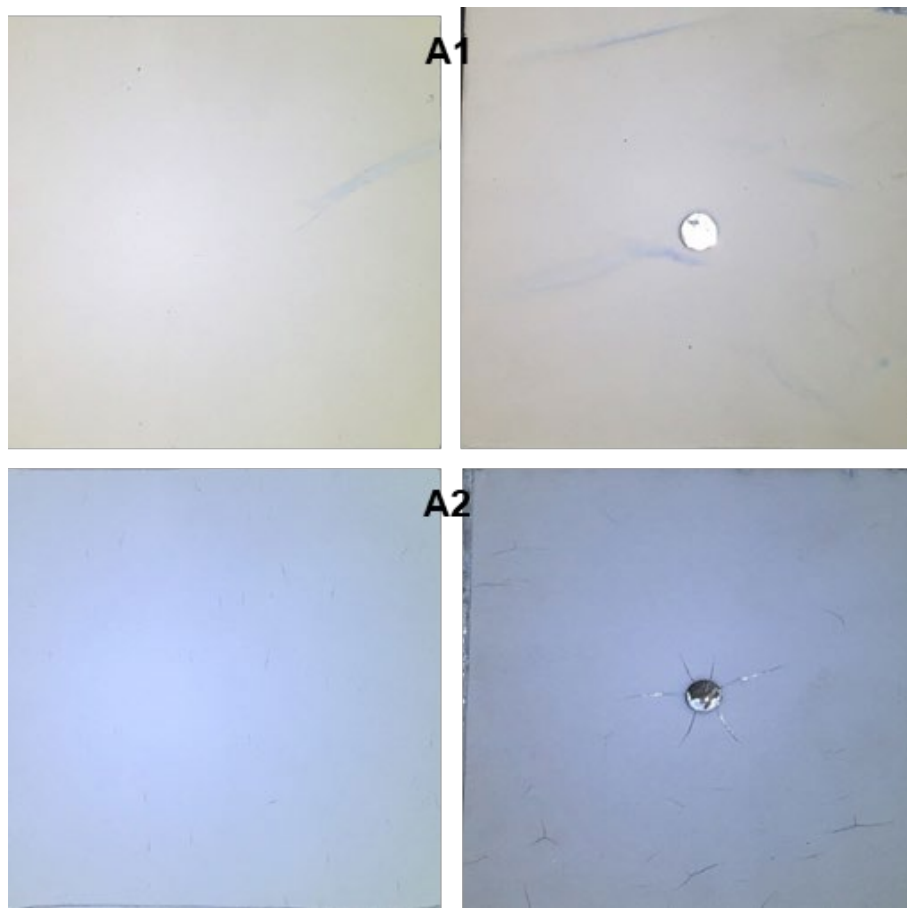
Fuente: elaboración propia

Se considera la geometría de 60° que, como se menciona es el utilizado en pinturas. Se realizan 5 mediciones de brillo en cada muestra y, se promedian los resultados. De ello, se desprende que la pintura S1 es la más brillante con un valor de 4,6. Por otro lado, las pinturas base acuosa obtuvieron valores similares: el menor es la pintura A1 con un valor de 2,02, en segunda instancia la pintura A2 presenta un valor de 2,46 y la pintura A3 un valor de 2,38. Todos los valores tienen un desvío menor a 0,06. Se desprende del mismo que la película de pintura base solvente es más brillante que las películas base acuosa, aspecto que se puede observarse a simple vista.

4.3.4.3 Aspecto visual

Para la evaluación del aspecto visual y comparación de imágenes de muestras, se diseñan dispositivos de inspección visual que se detallan en el Anexo A.

En la Figura 4-15 se presentan las fallas visuales al aplicar la pintura en chapas cincadas. En este caso, se comparan dos probetas de cada muestra de pintura confeccionadas para distintos ensayos. Las figuras de la izquierda son muestras realizadas para el ensayo WTAT en la cual la pintura se aplica con la barra de aplicación. En cambio, las figuras de la derecha son muestras donde la aplicación se realiza por gravedad como se ilustra en la explicación del ensayo *Taber Abraser*.



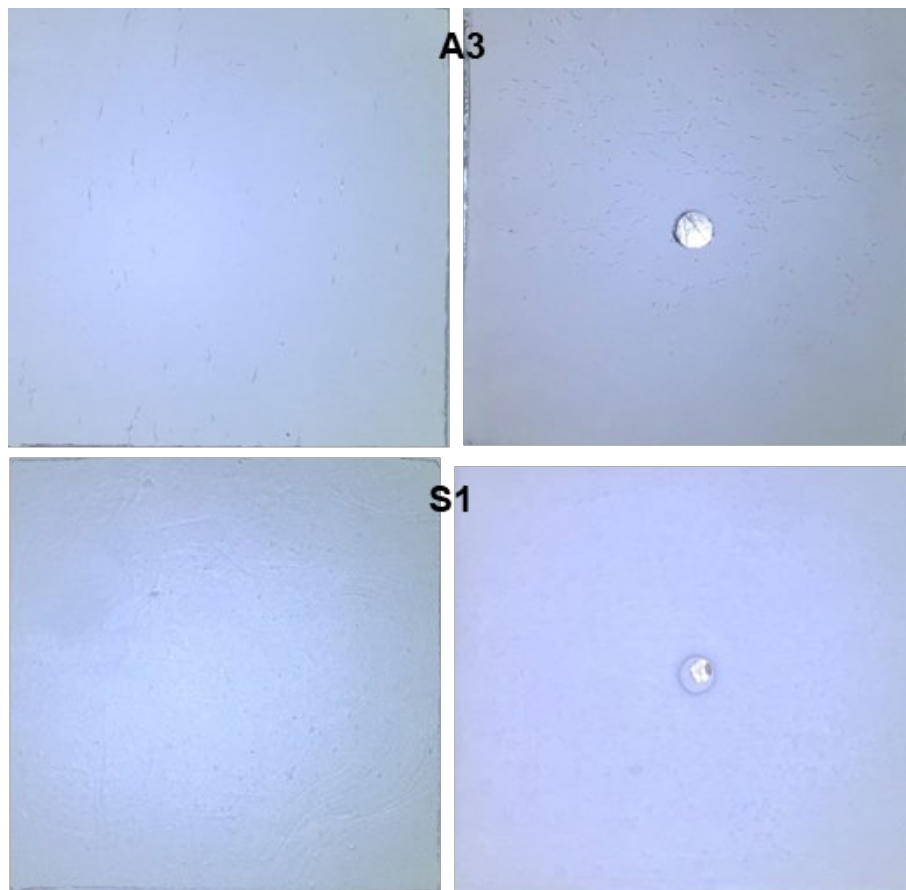


Figura 4-15. Evaluación visual de la película seca

Fuente: elaboración propia

Se pueden destacar aspectos en cada una de las pinturas base acuosa, por ejemplo, en el caso de la pintura A1 se produce una contracción por secado que se pone en evidencia por la disminución del espesor observada en varias zonas de la misma. La pintura A2 y A3 tienen fisuras de diferentes magnitudes, por ejemplo, en el caso de la pintura A2 son significativas y se podría decir que es un macro-agrietado, frecuente en este tipo de pinturas. Esto se justifica debido a que el fenómeno de coalescencia no es adecuado bajo condiciones de alta velocidad de evaporación del agua. En cambio, en el caso de la pintura A3 son fisuras frecuentes en los látices que se presentan en una mayor cantidad, pero con un tamaño menor.

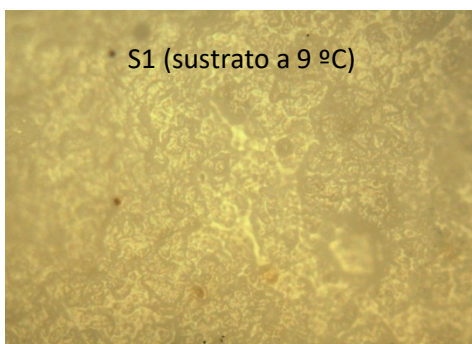
En el caso de la pintura base solvente no se evidencian este tipo de falla en las imágenes mencionadas, pero como se verá más adelante, en estos materiales es común observar la aparición de ampollas, principalmente en el caso de la aplicación sobre probetas de hormigón.

4.3.5 Microscopía óptica y electrónica de barrido

Para determinar las características superficiales de las pinturas se realiza un análisis de imágenes de las muestras S1 y A3 obtenidas con el microscopio Olympus BX51 del LEMaC. Para dicha comparación se preparan muestras de ambas pinturas sobre un sustrato que se encuentra a 9 °C y para el caso de la pintura A3 se preparan además muestras con el mismo a 20 °C con el objetivo de observar diferencias en la formación de la película de las pinturas.

Para una mejor comparación de las superficies de las pinturas base acuosa y base solvente se obtienen imágenes en el microscopio electrónico de barrido (SEM) marca FEI, modelo Quanta 200, del Laboratorio de Investigaciones de Metalurgia Física de la Universidad Nacional de La Plata (LIMF, UNLP). Para ello, se eligen muestras de las pinturas A3 y S1 que son previamente metalizadas con oro. En este último caso las muestras son confeccionadas en sustratos a 25 °C. Por último, se realiza una comparación de las cuatro películas de pintura, aplicadas en idénticas condiciones, con la lupa binocular Olympus SZH10 del INREMI.

En la Figura 4-16 se presentan las fotografías obtenidas de las pinturas S1 y A3 en Microscopio Olympus BX51 en las que se indica la temperatura de aplicación en cada caso. En las imágenes puede observarse la diferencia del comportamiento en la pintura base acuosa con baja temperatura al momento de la aplicación. Es apreciable la formación de una película más homogénea en el caso de la muestra realizada a 20 °C y la formación de sectores donde se encuentran concentrados los pigmentos cuando la formación de la película se lleva a cabo a menor temperatura.



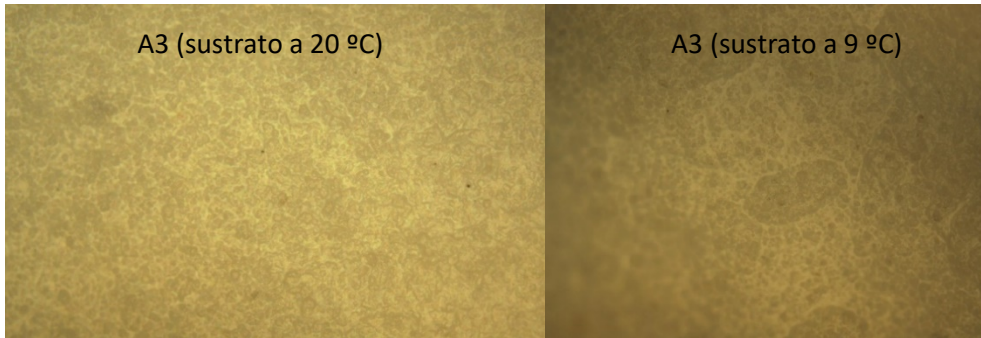


Figura 4-16. Imágenes fotográficas tomadas en un microscopio Olympus del LEMaC

Fuente: elaboración propia

La Figura 4-17 y la Figura 4-18 muestran las imágenes obtenidas por SEM de las pinturas S1 y A3, respectivamente, con diferentes magnificaciones. Del análisis de estas, se destaca el aspecto más poroso de la pintura A3 donde se observa la aglomeración de pigmentos durante la formación de la película debido al proceso de fusión en frío que caracteriza a las pinturas base acuosa. En cambio, en las imágenes se observa que la pintura S1 presenta un aspecto más liso, debido a que en este caso la película se forma sólo por evaporación del solvente. Es importante mencionar en este punto que el mayor brillo presentado por la pintura S1 en la microscopía óptica se debe a esta diferencia.

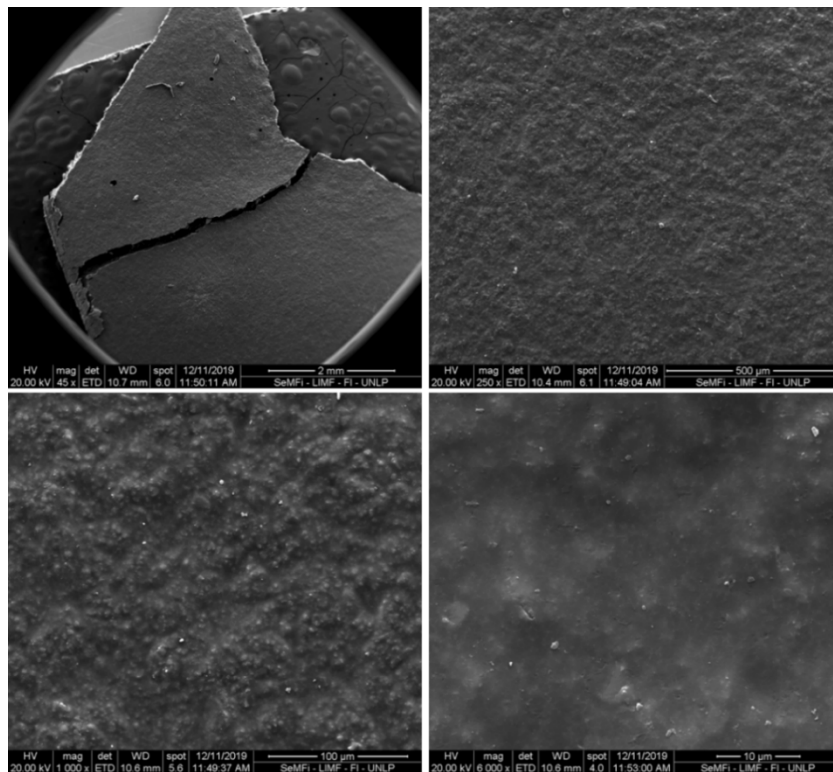


Figura 4-17. Fotografías de muestra S1 observadas en el microscopio del LIMF, UNLP

Fuente: elaboración propia

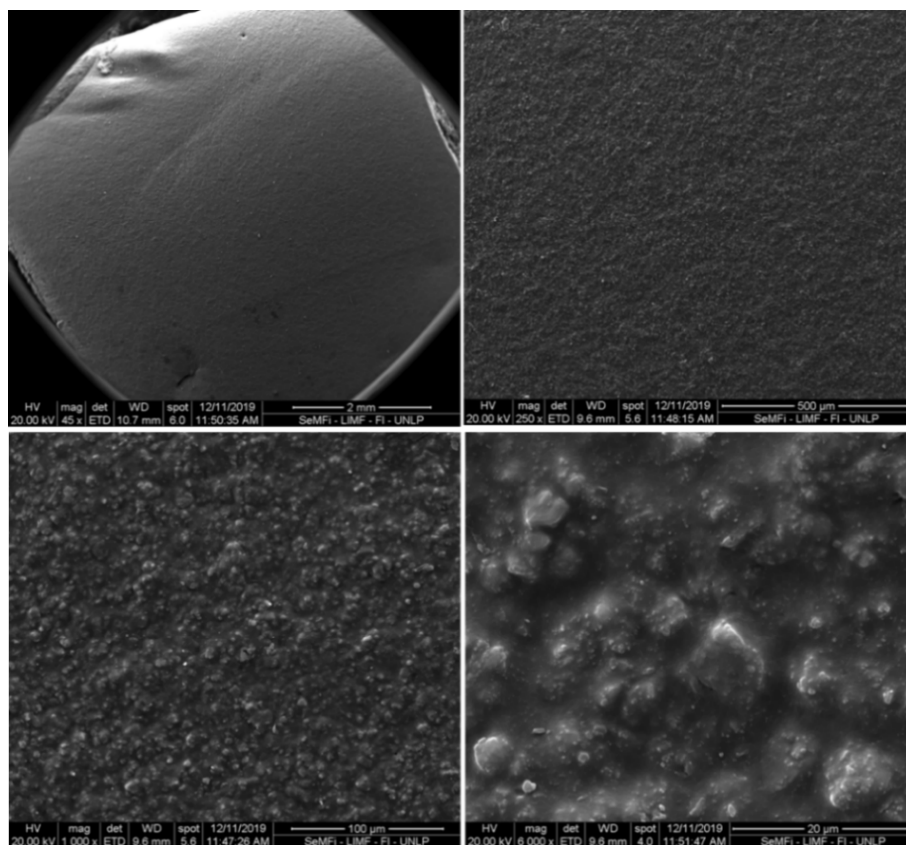


Figura 4-18. Fotografías de muestra A3 observadas en el microscopio del LIMF, UNLP

Fuente: elaboración propia

En la Figura 4-19 se presentan las imágenes de las cuatro muestras en estudio obtenidas con la Lupa. Se puede observar claramente el aspecto más uniforme (lo que le otorga mayor brillo) de la pintura S1 y que la pintura A1 es la que presenta la superficie más rugosa. Por otra parte, las pinturas A2 y A3 presentan ambas una superficie uniforme, aunque se observa menor brillo comparadas con la S1 debido probablemente a la mayor rugosidad de la superficie.

Por otro lado, de la comparación de las imágenes obtenidas por SEM (Figura 4-17 y Figura 4-18) y en complemento con el estudio de FTIR (Figura 4-8) se considera que las partículas que se observan podrían deberse al carbonato de calcio presente en la pintura A3. Según lo observado se podría considerar que la pintura A1 presenta un mayor contenido de cargas (carbonato de calcio) de mayor tamaño y es por este motivo presenta un aspecto más poroso (Figura 4-19).

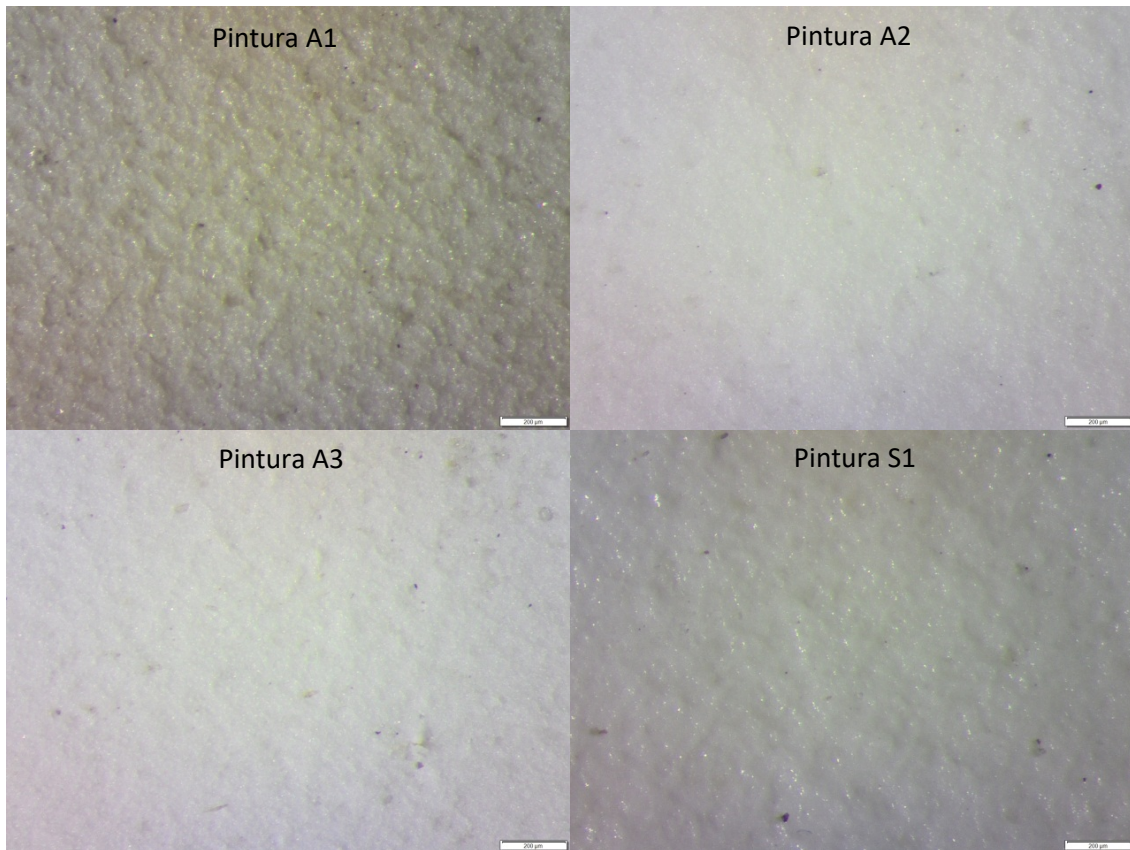


Figura 4-19. Imágenes de la lupa de las muestras de pintura A1, A2, A3 y S1

Fuente: elaboración propia

4.3.6 Ensayos de resistencia al ataque químico

Este ensayo tiene como objetivo determinar la resistencia al ataque químico de *gas oil*, aceite SAE y agua en las pinturas de demarcación vial. El procedimiento de ensayo se encuentra establecido en la Norma IRAM 1221/18 donde se utilizan como parámetros de evaluación: la observación de defectos y cambios en la dureza al lápiz.

El procedimiento considerado para este ensayo consiste en aplicar la pintura volcando la misma y homogeneizando el espesor con la ayuda de una regla sobre una placa de vidrio. Se dejan secar los paneles de vidrio en una posición horizontal por 24 horas en condiciones controladas (25°C de temperatura y 65% de humedad relativa). Luego se colocan en estufa a 110°C por un periodo de 3 horas. Se deja a temperatura ambiente por un período de 2 horas y se procede a evaluar la dureza shore A (valor inicial). Posteriormente, cada muestra se somete a cada uno de los compuestos enunciados de la siguiente manera:

- Agua: Se sumerge el panel, en forma vertical, en un vaso de precipitación con agua por un periodo de 72 horas.
- Aceite mineral: Se agrega al panel en forma horizontal una pipeta de 1 ml de aceite mineral SAE40 y se tapa con un vidrio reloj.
- Gas Oil: Se agrega al panel en forma horizontal una pipeta de 1 ml de Gas Oil y se tapa con un vidrio reloj.

Transcurrido el tiempo, se retira el vidrio reloj y se eliminan los reactivos de la superficie con papel absorbente y se procede a evaluar nuevamente la dureza shore A, variación del peso y aspecto. En la Figura 4-20 se establece una simplificación gráfica del proceso realizado.

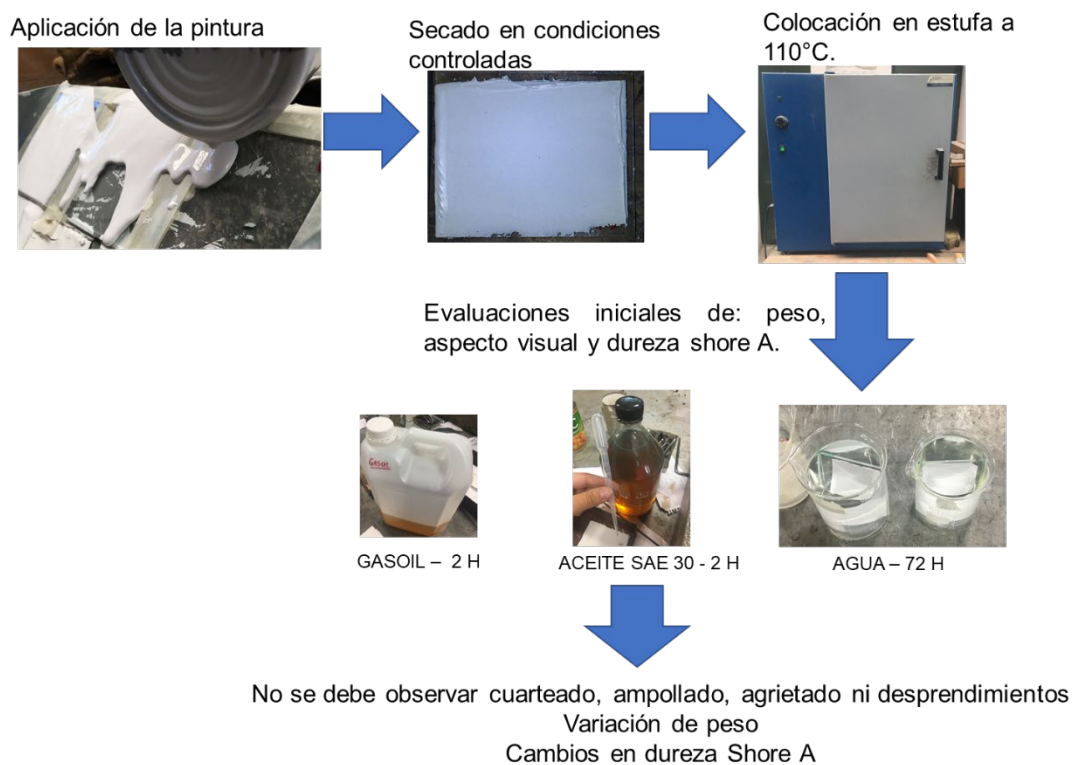


Figura 4-20. Procedimiento para la determinación de la resistencia al ataque químico

Fuente: elaboración propia

A los efectos de poder realizar un análisis de cada uno de los factores se muestra en la Tabla 4-6, la variación en el peso de la película de pintura luego de sumergir las muestras en agua durante 72 h. Este valor se compara más adelante cuando se realiza el estudio de la absorción de agua en pinturas, pero se destaca el valor elevado que presenta la pintura A1. Asimismo, existe una diferencia importante entre todas las pinturas acuosas y la pintura base solvente.

Tabla 4-6. Resultados de Absorción en muestras sumergidas durante 72 horas
Fuente: elaboración propia

	PESO DEL VIDRIO	PESO 3 HORAS A 105°C	PESO DE PINTURA P ₁	PESO 72 HORAS EN AGUA	PESO DE PINTURA P ₂	ABSORCIÓN (72 HORAS) (%)
A1	48,1525	51,6513	3,4988	52,1485	3,996	14,2
A2	48,3788	51,2709	2,8921	51,481	3,1022	7,3
A3	47,6722	55,6915	8,0193	55,9428	8,2706	3,1
S1	48,3698	52,8101	4,4403	52,8812	4,5114	1,6

En la Figura 4-21 se muestra la variación de la Dureza Shore A, utilizada en reemplazo del método indicado por la norma por no tener disponibilidad del equipamiento, luego de haber sido sometidas las muestras a las distintas condiciones según lo indicado en la Norma IRAM 1221/18. Se destaca que la pintura base solvente es la que presenta una mayor pérdida de la dureza con los efectos del agua y el gas oil. Relacionado al aspecto visual no se notan fallas en la película, sí el cambio en el aspecto por las características del *gas oil* y del aceite.

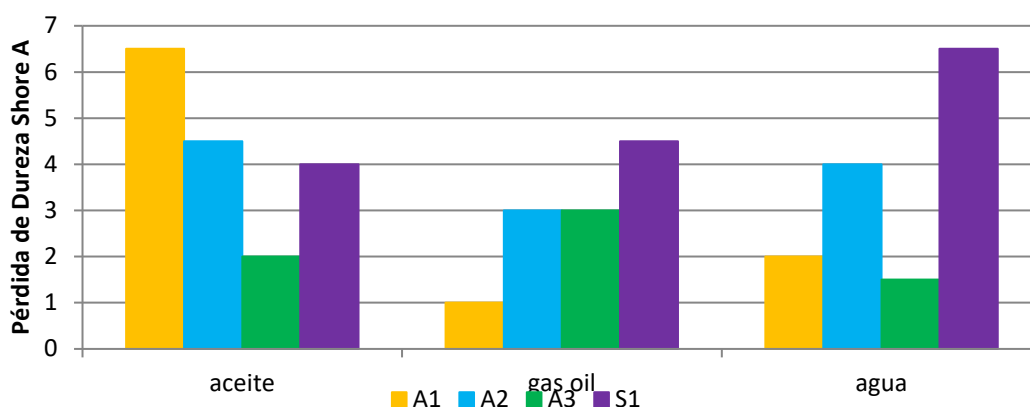


Figura 4-21. Resultados de pérdida de Dureza Shore A después del ataque químico

Fuente: elaboración propia

4.4 Ensayos para evaluar la durabilidad de los recubrimientos retrorreflectantes

4.4.1 Ensayo *Wheel Tracking Test* (WTT)

Como se menciona en el Capítulo anterior se implementa este ensayo para evaluar el comportamiento de los materiales viales con el paso de la rueda. El procedimiento consiste en aplicar una carga mediante el paso de una rueda, con cierta frecuencia, nivel

de carga y a una temperatura definida de ensayo, para el estudio de los efectos combinados de tránsito y temperatura sobre la marca vial. La principal ventaja de este ensayo es que el equipo se utiliza en laboratorios viales debido a que se encuentra establecido por las especificaciones de vialidad. La evaluación del desempeño en este método se plantea mediante la valoración de la visibilidad y la resistencia al deslizamiento con el paso de las ruedas y la comparación visual.

Metodología de ensayo

Para la confección de las muestras se moldean placas de hormigón cuadradas de 30 cm de lado y 5 cm de espesor, con una textura RG1 (según la Norma UNE EN 13036-1). En la Figura 4-22, se muestran las imágenes del moldeo de las probetas. Dicho hormigón está compuesto por cemento CPC 40, agregado grueso de tipo piedra partida granítica con tamaño máximo de 9,5 mm y arena silícea de trituración.

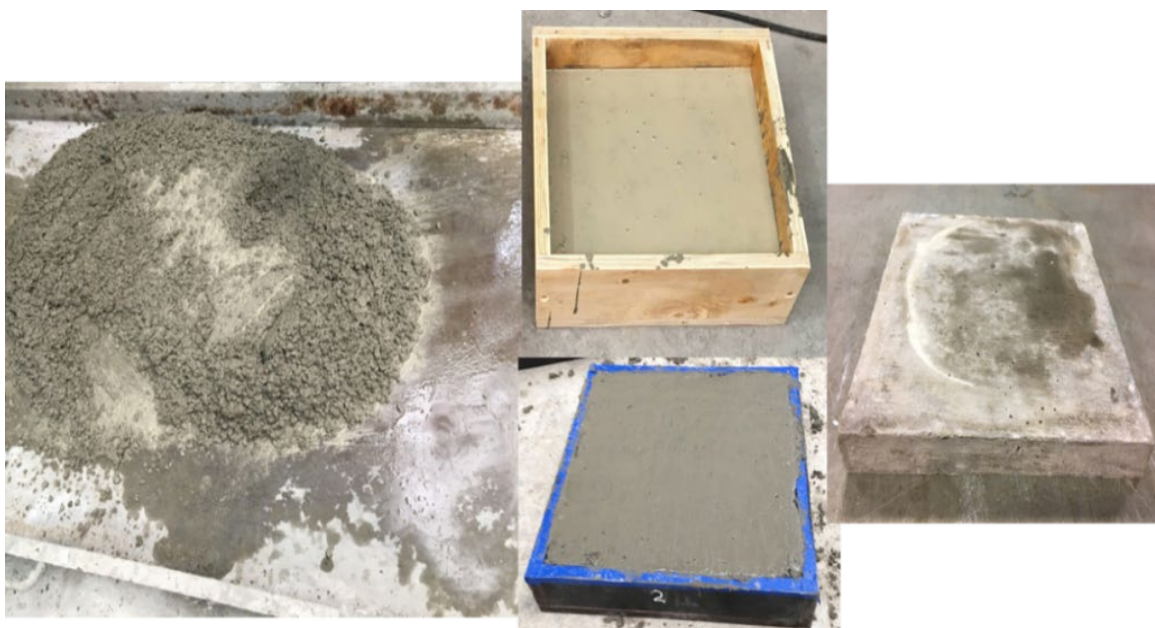


Figura 4-22. Moldeo de placas de Hormigón

Fuente: elaboración propia

Luego se procede a pintar la superficie, en franjas de 10 cm de ancho, con las pinturas A1 y S1 con las microesferas de premezcla P incorporadas a la pintura en una proporción de 300 g/l. Para el tendido de la pintura se utiliza un dispositivo de aplicación con manija (detallado en el Anexo A) que permite obtener un espesor húmedo uniforme de aproximadamente 0,6 mm en las muestras. Sin embargo, algunas muestras como se detalla en la Tabla 4-4, se aplican con pincel. Además, en el caso de varias probetas luego de aplicada la pintura se siembran microesferas tipo TAF-S2 en una proporción

de 500 g/m² con un dispositivo de tipo “Salero”. En la Figura 4-23 se presentan los dispositivos enunciados y los mismos se describen con mayor detalle en el Anexo A.

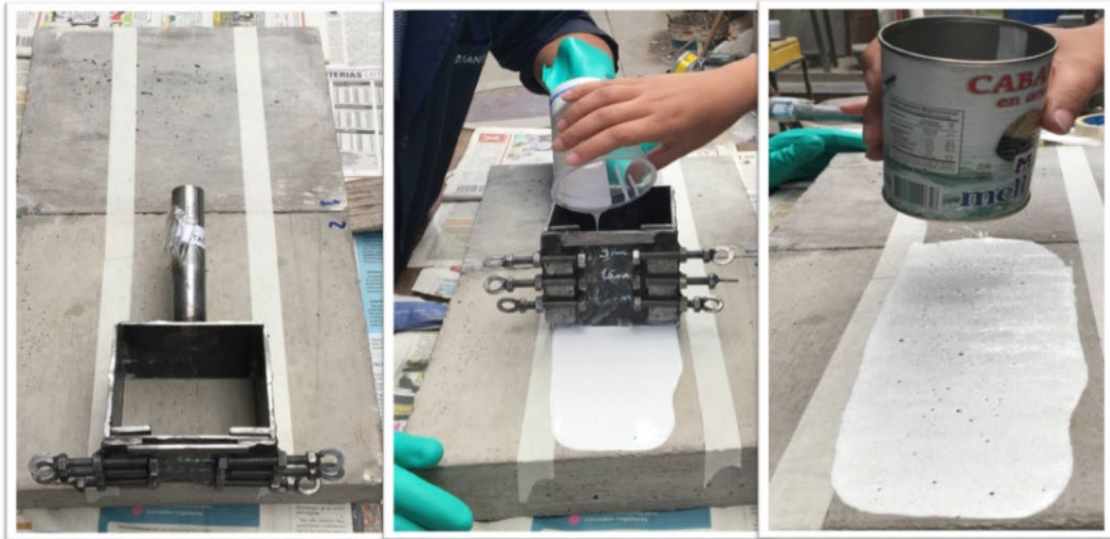


Figura 4-23. Pintura con dispositivo “plano” para obtener espesor uniforme y sembrado de microesferas con método de tipo “salero” Fuente: elaboración propia

Debido a la gran diversidad de opciones empleadas para la aplicación de los revestimientos en la Tabla 4-7 se detallan las muestras ensayadas, los materiales empleados en cada caso y, la forma en que se aplica la pintura debido a que como se menciona en algunos casos se usa el pincel por limitación del ancho del sustrato. Es pertinente aclarar que en el momento en que se realizaron los ensayos mencionados se contaba sólo con las pinturas A1 y S1.

Tabla 4-7. Denominación de muestras y materiales utilizados en el ensayo WTT
Fuente: elaboración propia.

MUESTRA	PINTURA ACRÍLICA	FORMA DE APLICACIÓN	MICROESFERAS DE SEMBRADO
1-S	Pintura S1 con microesferas de premezclado tipo P1	Dispositivo	Microesferas S2 con TAF
2-S	Pintura S1 con microesferas de premezclado tipo P1	Dispositivo	Microesferas S2 con TAF
3-A	Pintura A1 con microesferas de premezclado tipo P1	Pincel	Sin microesferas
4-A	Pintura A1 con microesferas de premezclado tipo P1	Pincel	Sin microesferas
5-S	Pintura S1 con microesferas de premezclado tipo P1	Pincel	Microesferas S2 con TAF
6-S	Pintura S1 con microesferas de premezclado tipo P1	Pincel	Microesferas S2 con TAF
7-S	Pintura S1 con microesferas de premezclado tipo P1	Dispositivo	Sin microesferas
8-A	Pintura A1 con microesferas de premezclado tipo P1	Dispositivo	Sin microesferas
9-S	Pintura S1 con microesferas de premezclado tipo P1	Dispositivo	Sin microesferas
10-A	Pintura A1 con microesferas de premezclado tipo P1	Dispositivo	Sin microesferas
11-S (*)	Pintura S1 con microesferas de premezclado tipo P1	Dispositivo	Sin microesferas
12-A	Pintura A1 con microesferas de premezclado tipo P1	Dispositivo	Sin microesferas
13-S	Pintura S1 con microesferas de premezclado tipo P1	Dispositivo	Microesferas S2 con TAF
14-S	Pintura S1 con microesferas de premezclado tipo P1	Dispositivo	Microesferas S2 con TAF

(*) *El ensayo se repitió reiteradas veces hasta alcanzar los 100000 ciclos.*

Antes de colocar las muestras en la cabina, se realizan las evaluaciones iniciales que se detallan a continuación. Mediante la utilización del Retrorreflectómetro portátil de la empresa Becha SA, Figura 4-24, se obtienen los valores de luminancia en condiciones de iluminación difusa (Q_d) y la retroreflexión con la geometría de 30 metros ($RL30$). Si bien el equipo brinda ambos valores de retroreflexión se decide utilizar, para el análisis, el valor de la geometría a 30 metros debido a que como se comenta en el inciso 2.3.1.2 es la utilizada en EE.UU. y en otros países.



Figura 4-24. Evaluación de la retroreflexión y luminancia de las probetas con el retroreflectómetro portátil. Fuente: elaboración propia

Para evaluar la resistencia al deslizamiento se utiliza el péndulo inglés TRRL, Figura 4-25. El procedimiento es el indicado en la norma IRAM 1555/1998 pero aplicado en marcas viales. Para ello se limpia la superficie y se rocía la muestra con agua. Luego, se suelta el brazo y cuando alcanza su altura máxima, se toma con la mano izquierda en el retorno para evitar que se dañe el mismo y se lee la posición de la aguja. Posteriormente se acomoda el equipo para reiniciar la medida. Se realizan 5 determinaciones del valor verificándose que no varíe en más de 3 unidades.



Figura 4-25. Evaluación de la resistencia al deslizamiento con el Péndulo inglés Fuente: elaboración propia

Asimismo, en paralelo con la implementación del ensayo, se estudia cómo realizar una comparación visual de las muestras. Para ello, se toman fotos en una cabina construida con una iluminación ubicada en la cara superior con una lámpara led para la toma de fotos simulando la luz diurna. En el caso de muestras con microesferas de vidrio, las fotos se toman con el *flash* de la cámara y la lámpara apagada. En el anexo A se detallan con mayor detalle las características de la cabina de inspección visual construida, Figura 4-26.



Figura 4-26. Cabina de inspección visual para toma de imágenes de las probetas

Fuente: elaboración propia

Para simular el desgaste en servicio, como se comenta en el Capítulo 3, el procedimiento consiste en dejar en acondicionamiento las placas de hormigón pintadas durante 2 horas a una temperatura de 60°C. Las placas se alinean sobre el simulador de desgaste de forma que las marcas viales sean paralelas al movimiento relativo de la rueda. La Figura 4-27 muestra una placa con marca vial colocada para su ensayo en el equipo WTT.



Figura 4-27. Ensayo en equipo WTT de la marca vial

Fuente: elaboración propia

Luego, se procede a apoyar la rueda del equipo sobre la pintura y se da inicio al ensayo. Se realiza el ensayo a 60 °C bajo las condiciones indicadas del equipo durante 10.000 ciclos. Como se menciona en la Tabla 4-7 este procedimiento se reitera 10 veces sucesivas en la probeta 11-S con mediciones intermedias.

Finalmente, se realiza la evaluación de la *performance* obteniéndose los parámetros finales de Resistencia al Deslizamiento, Retrorreflexión y Luminancia; así, como la nueva captura de imagen en las mismas condiciones dentro de la cabina para inspección visual, de manera de poder establecer una comparativa anterior y posterior al ensayo sobre la pintura.

Resultados y Discusión del ensayo WTT

Como referencia se utilizan los límites establecidos en la norma española UNE-EN 1436/09 “Materiales para señalización vial horizontal”. Esto se debe a que en la normativa y especificaciones de Argentina no se utiliza el ensayo de resistencia al deslizamiento y, en lo referente a la retrorreflexión, aún no existe una unificación de valores.

La Figura 4-28 presenta los resultados obtenidos en la evaluación de la resistencia al deslizamiento en las instancias previas y posteriores al ensayo. Se considera el valor mínimo para la aceptación de 45 SRT según la norma UNE-EN 1436/09.

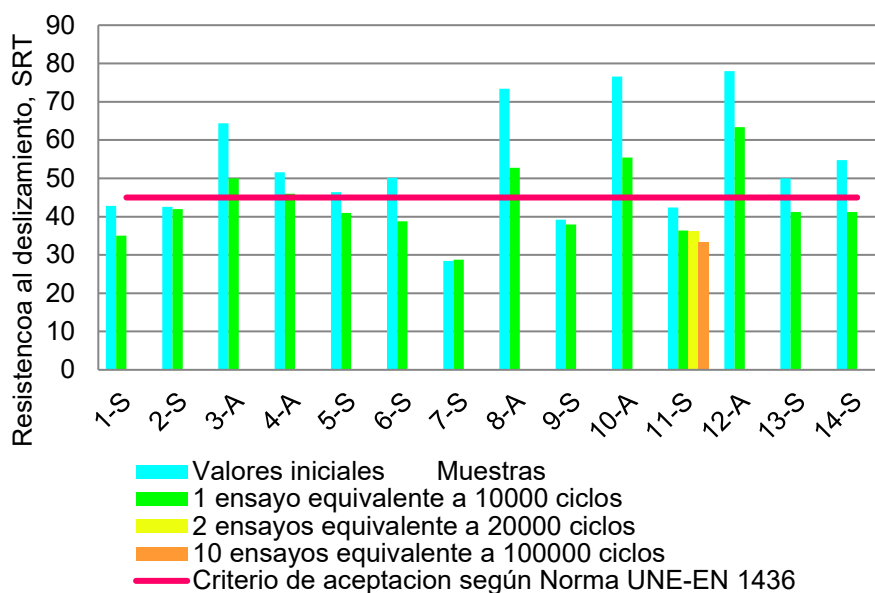


Figura 4-28. Resistencia al deslizamiento de las probetas según Norma UNE-EN 1436

Fuente: elaboración propia

Las pinturas base acuosa cumplen con el criterio de aceptación, incluso después de 10.000 ciclos de ensayo, correspondiente a 20.000 pasadas de rueda. Por otro lado, las pinturas base solvente, no siempre cumplen con este criterio. Se observa que, en el caso correspondiente a la muestra 11-S en la que se realizan 100.000 ciclos de sollicitación, la mayor pérdida porcentual se tiene luego del primer ensayo, ya que en los posteriores va disminuyendo en forma menos pronunciada. Sin embargo, es importante recordar que la pintura es colocada con un dispositivo de laboratorio y no con los equipamientos de obra.

De este estudio se desprende que se debe evaluar la condición de resistencia al deslizamiento en los productos comercializados en el país, debido a que en algunos casos se encuentra que no cumplen los requisitos mínimos. Se considera muy importante considerar este aspecto, en el caso de la aplicación sobre sendas peatonales, en las cuales se considera más crítico dicho parámetro. Esto es debido a que circulan vehículos menores (motos y bicicletas) más susceptibles a resbalarse en condiciones húmedas.

En el caso de las muestras en las que se siembran microesferas, se evalúa la retrorreflexión RL_{30} , es decir con geometría “a 30 metros”, Figura 4-29.

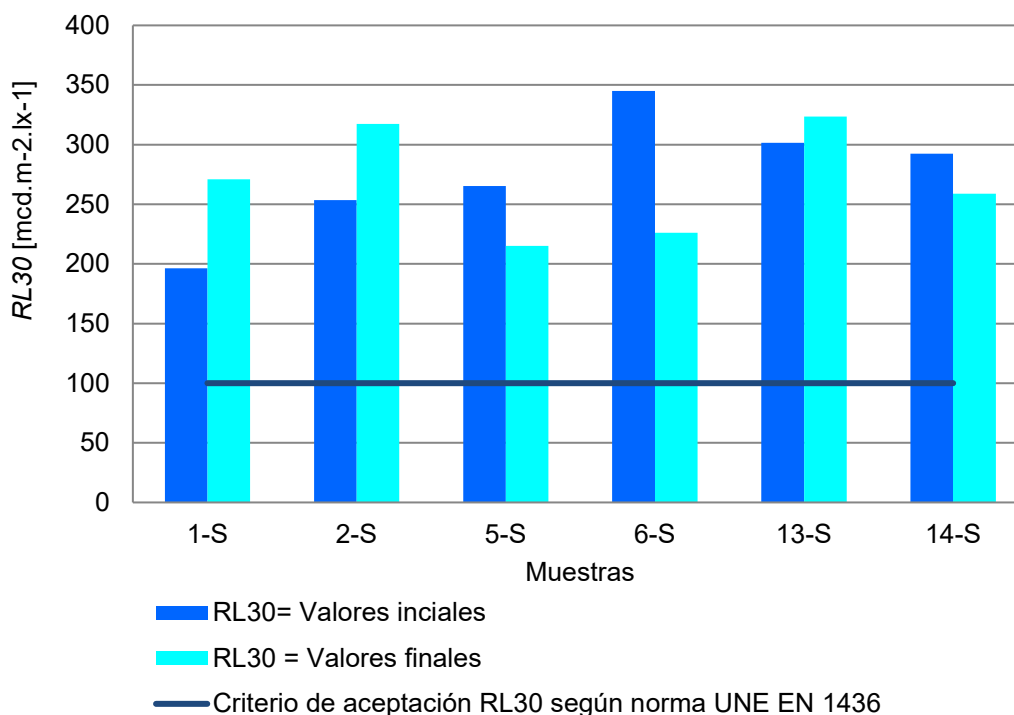


Figura 4-29. Retrorreflexión RL_{30} de las probetas según Norma UNE-EN 1436

Fuente: elaboración propia

En este aspecto, es necesario continuar con el procedimiento debido a que se tienen comportamientos dispares; se destaca que se debe trabajar en la forma de la distribución de las microesferas para obtener un sembrado uniforme. De todas formas, se puede observar que con la dosificación propuesta se tienen valores elevados de retrorreflexión, considerando que prácticamente en todos los casos, salvo en la muestra 1-S, el valor se mantiene por encima de 200 $\text{mcd.lx}^{-1}.\text{m}^{-2}$. Respecto a esta recomendación, en el anexo B, se analizan valores de retrorreflexión con distintas dosificaciones de microesferas.

En las muestras 1-S, 2-S, 3-A, 4-A, 5-S, 6-S, 13-S y 14-S se verifica el valor de Luminancia, en iluminación difusa, en el período inicial y final, Figura 4-30.

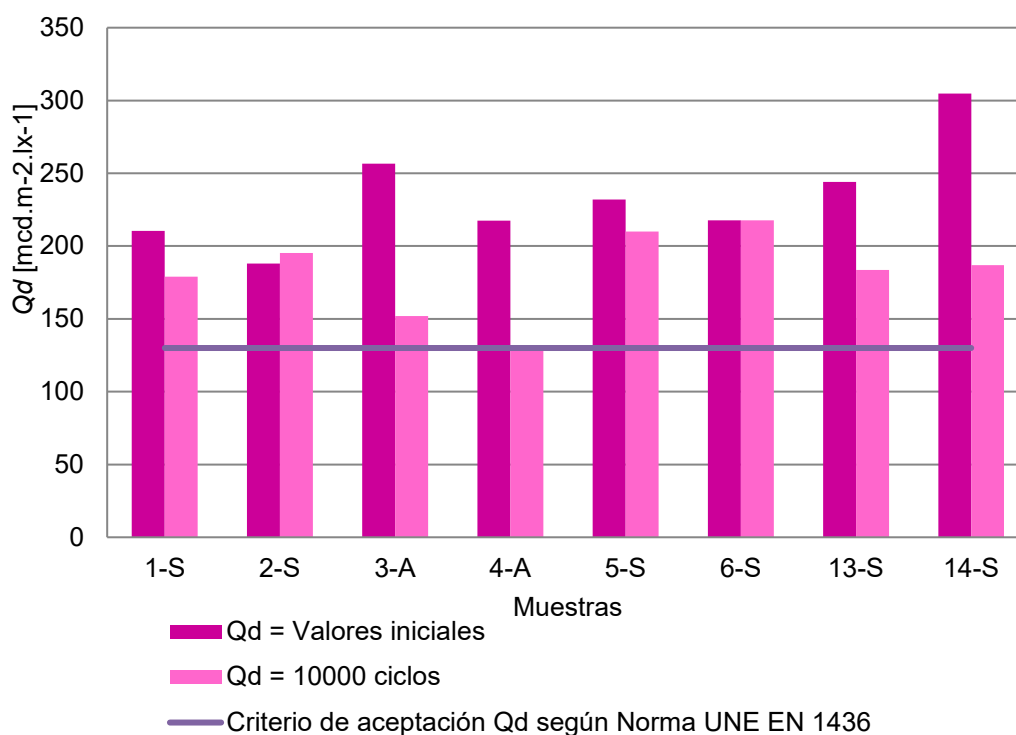


Figura 4-30. Luminancia en iluminación difusa según norma UNE-EN 1436

Fuente: elaboración propia

Se observa que, si bien la luminancia inicial es mayor en las pinturas base acuosa, se tiene una disminución del orden del 40 % luego del ensayo. En cambio, las pinturas base solvente presentan valores menores y se mantienen en el rango de alrededor del 10 % del valor en la mayoría de las probetas, salvo en el caso de las probetas 13-S y 14-S cuya pérdida es en un rango superior. Este comportamiento es coherente con la evaluación visual del material, en el cual la pintura base solvente forma una película más

brillante y con un comportamiento hidrofóbico, observado al humedecer la superficie para realizar el ensayo de resistencia al deslizamiento, Figura 4-31. Por otro lado, en la Figura 4-32 se presenta la marca de la huella en ambos tipos de pintura, en la que se observa que la pintura base acuosa A1 se mancha de forma más notoria que la pintura base solvente.



Figura 4-31. Comportamiento de la pintura base solvente (izq.) y base acuosa (der.) frente al rociado del agua. Fuente: elaboración propia



Figura 4-32: Comparación visual posterior a ensayo de la pintura base solvente (izq.) y base acuosa (der.). Fuente: elaboración propia

Como se comenta anteriormente, la cabina de inspección visual, Figura 4-26, se construye en forma simultánea con este ensayo, por este motivo al ensayar las probetas 1-S, 2-S, 3-A, 4-A, 5-S y 6-S se está en proceso de análisis y, por lo tanto, las imágenes

son preliminares. Es importante destacar que, por la distribución de las marcas y con la finalidad de poder realizar más ensayos (se realizan 3 marcas viales por placa), se decide cortarlas teniendo en cuenta la ubicación de la rueda en el ensayo. En la Figura 4-33 se presentan las imágenes de las probetas 2-S con iluminación y con flash para resaltar las microesferas.

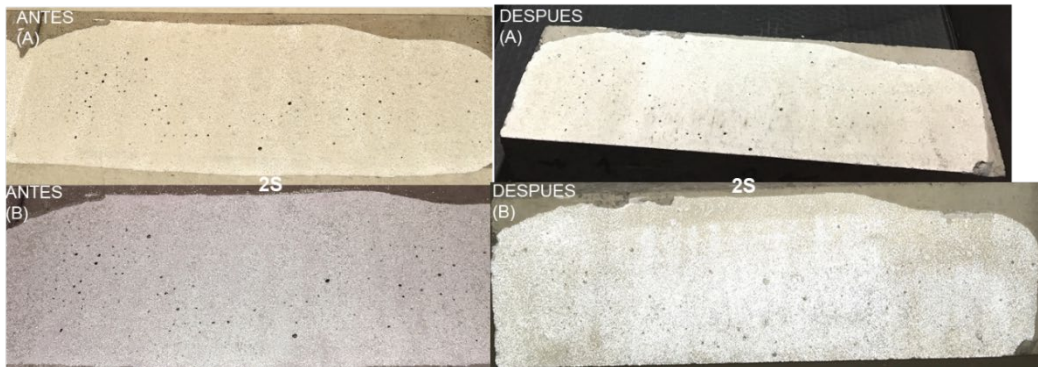


Figura 4-33. Comparación visual antes y después del ensayo WTT. (A): Imagen tomada con luz natural, con cámara sin flash. Imagen inferior (B): Imagen capturada con flash

Fuente: elaboración propia

De la misma forma, se tiene la Figura 4-34 con las probetas 5-S y 6-S que cuentan con microesferas sembradas. Por este motivo, se utiliza la cámara con iluminación mediante lámpara *led* tomadas con la cámara sin flash y las imágenes tomadas en la cabina con cámara con flash sin iluminación artificial luego del ensayo. En estos casos, no se tienen imágenes anteriores al ensayo en la cabina por este motivo se colocan las imágenes disponibles para la comparación. Esto destaca la importancia del desarrollo de un sistema para la comparación de imágenes en iguales condiciones.

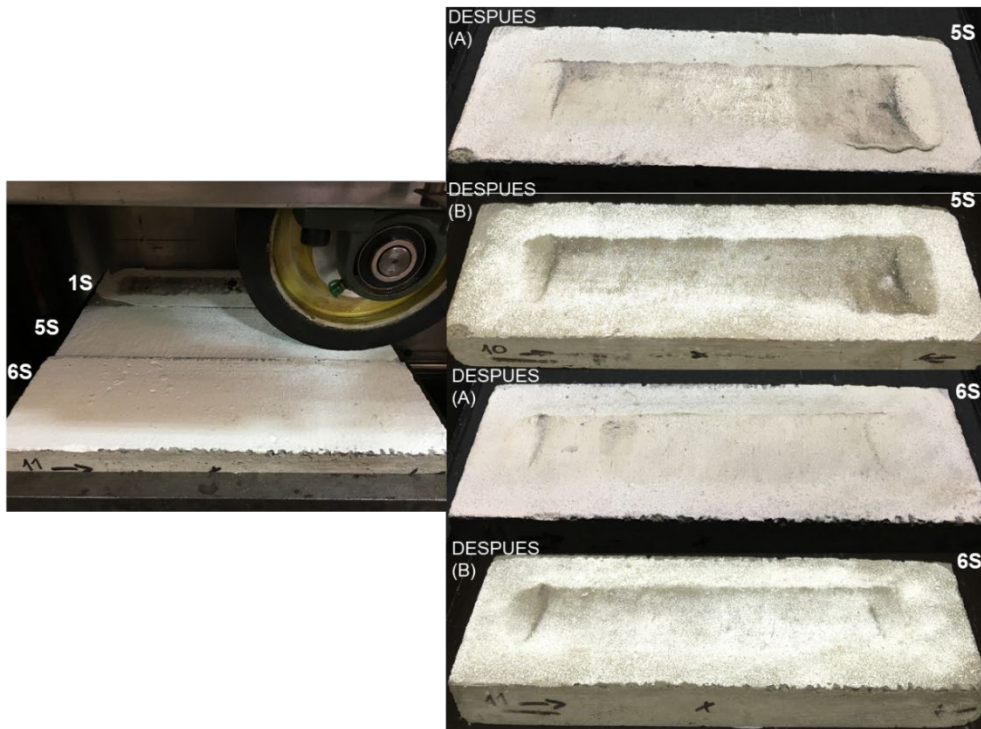


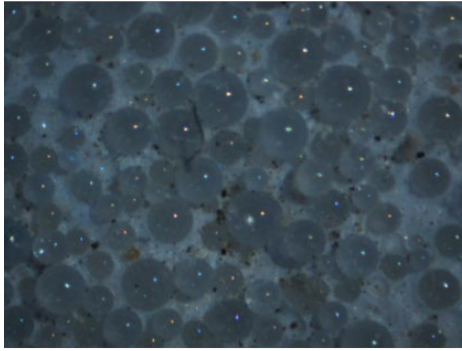
Figura 4-34 Izq.: Imagen tomada de las probetas 5-S y 6-S antes del ensayo. Der.: imágenes posteriores al ensayo WTT de las probetas en la cabina. (A): Imagen tomada con iluminación con lámpara de luz led, con cámara sin flash. (B): Imagen capturada con flash

Fuente: elaboración propia

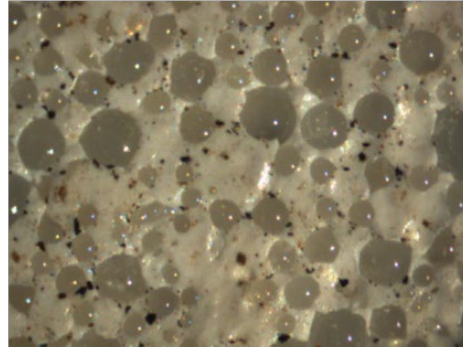
De esta forma, con las imágenes se desprende que la disminución del valor de retroreflexión observado en las probetas 5-S y 6-S se debe a que, como se observa a simple vista en la Figura 4-34 las dos probetas presentan pérdidas de las microesferas y marca del caucho sobre la pintura. Además, esto es congruente con el aspecto de la probeta 2-S que no presenta estas manchas.

La imagen en lupa, Figura 4-35, evidencia que en el caso de las probetas 5-S y 6-S la pintura se ablandó por la temperatura del ensayo y las microesferas se hundieron. Posiblemente este efecto en conjunto con la mancha de la rueda del caucho son los que han generado la disminución de la retroreflexión luego del ensayo.

Probeta 1-S



Probeta 6-S



Probeta 5-S

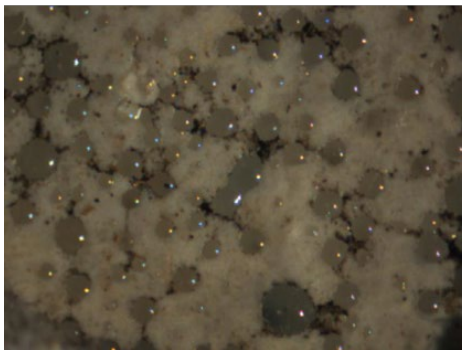


Figura 4-35. Observación en lupa de las 1-S, 5-S y 6-S luego del ensayo WTT

Fuente: elaboración propia

Con las muestras 3-A y 4-A, se pudo implementar el uso de la cabina que se presenta la Figura 4-36. En este caso no se utiliza el Flash de la cámara debido a que no se evalúa la retrorreflexión en las mismas.

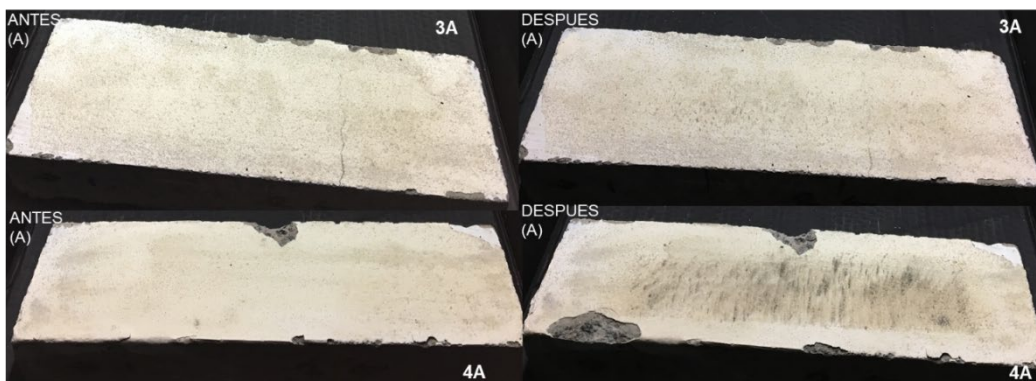
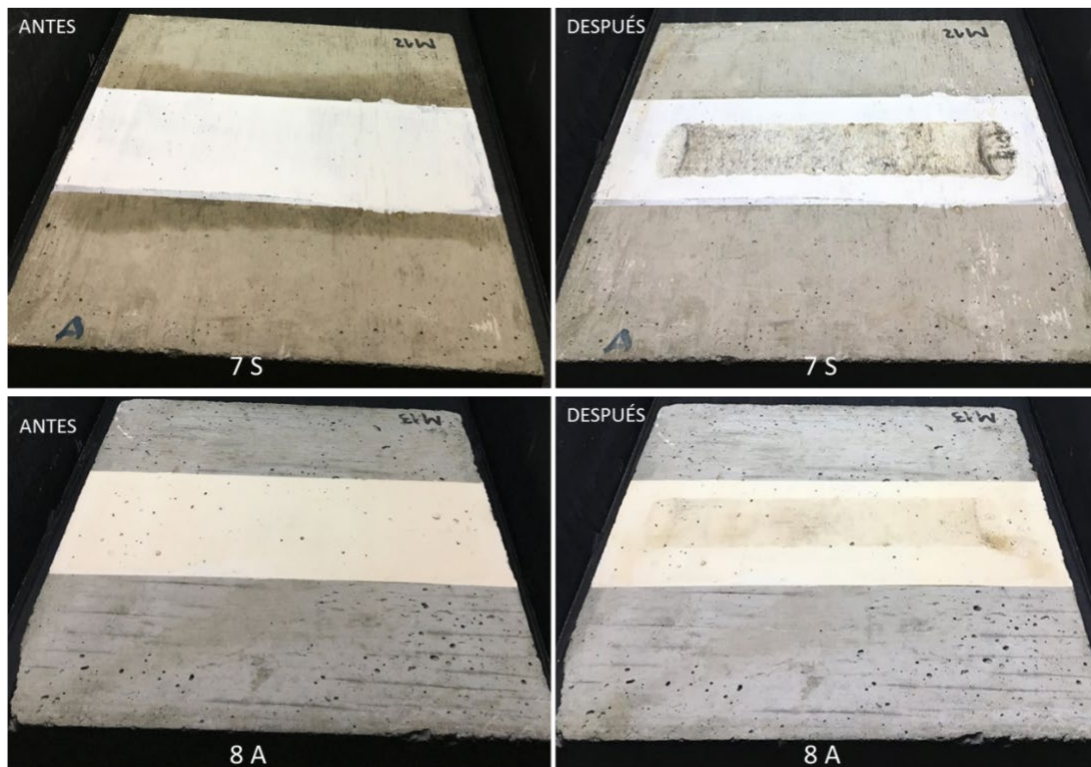


Figura 4-36. Comparación visual antes y después del ensayo WTT sobre probetas 3-A y 4-A en la cabina de iluminación realizada con iluminación mediante lámpara led, con cámara sin flash

Fuente: elaboración propia

Se muestra la comparación visual realizada en la cabina de las muestras 7-S, 8-A, 9-S, 10-A, 11-S, 12-A (Figura 4-37), y las muestras 13-S y 14-S (Figura 4-38). Como se observa en la Figura 4-37 muestra que en todos los casos la pintura acuosa A1 es de

un “blanco” distinto a la base solvente y que las mismas, salvo en el caso de la probeta 8-A, se manchan de forma más uniforme con el caucho de la rueda. Con respecto a la pintura base solvente S1, se tuvo un comportamiento distinto. Las mismas se ablandaron con la temperatura de ensayo (60°C). Estas muestras también se manchan con el caucho de la rueda, pero al ablandarse la muestra de pintura, las marcas se producen de forma más pronunciada en las zonas donde la rueda cambia la dirección (en los extremos). Además, es notorio el cambio en la textura superficial debido al comportamiento de la pintura.



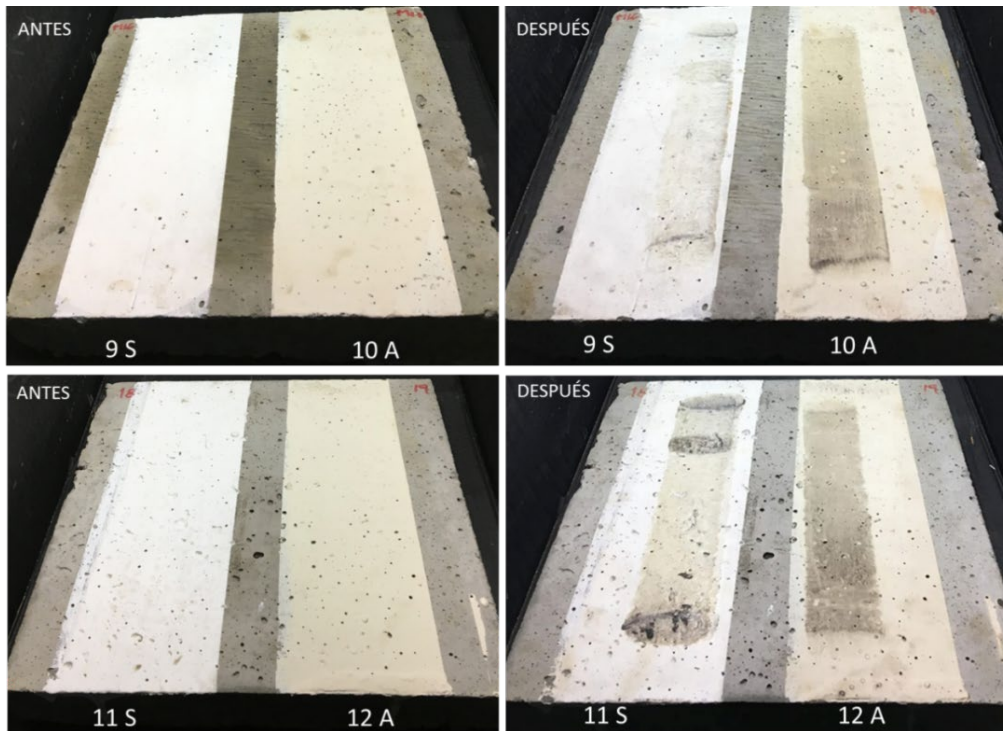


Figura 4-37. Comparación visual antes y después del ensayo WTT sobre probetas 7-S, 8-A, 9-S, 10-A, 11-S, 12-A, 11-S, 12-A con iluminación con lámpara de luz led

Fuente: elaboración propia

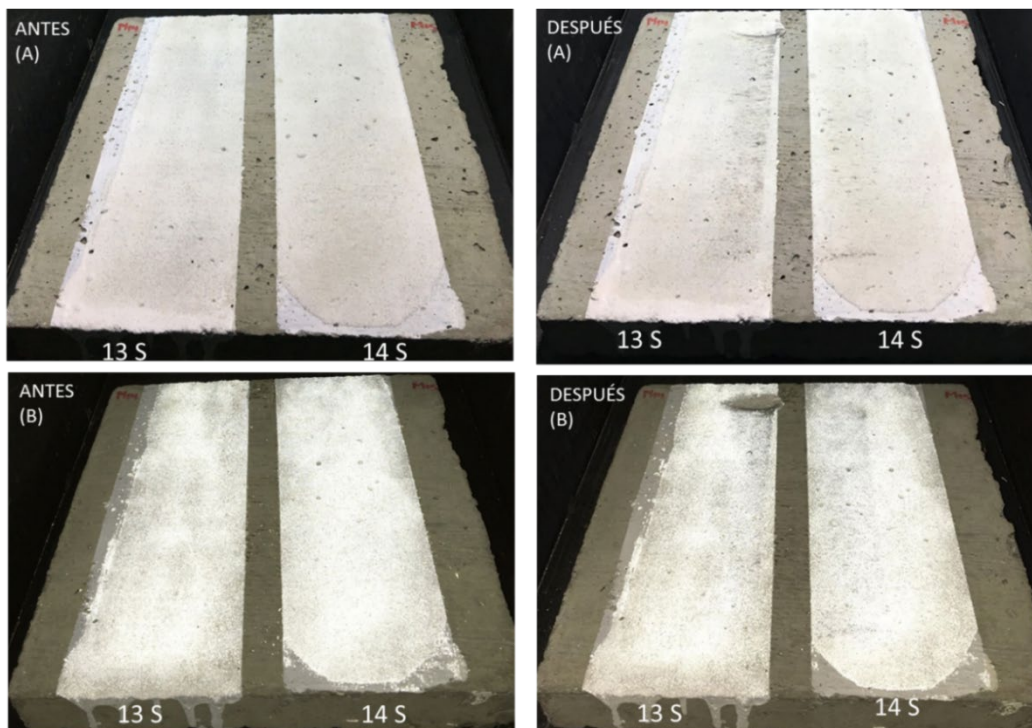


Figura 4-38. Comparación visual antes y después del ensayo WTT sobre probetas 13-S y 14-S. Imagen superior (A): Imagen capturada en cabina con iluminación mediante lámpara led, con cámara sin flash. Imagen inferior (B): Imagen capturada en cabina con cámara con flash sin iluminación artificial

Fuente: elaboración propia

La Figura 4-38 ilustra el comportamiento de las muestras con microesferas incorporadas. Solo la probeta 13-S presenta evidencia de ablandarse en la zona del extremo donde pasa la rueda. No se evidencian marcas de caucho en las probetas.

Por otro lado, de la observación de la Figura 4-37 y de la Figura 4-38 se desprende que ninguna de las muestras presenta la falla ilustrada en la Norma ASTM D-913/15 (utilizada para evaluar el deterioro por abrasión o desprendimiento como consecuencia del pasaje de vehículos) luego del ensayo. En la norma mencionada se establecen patrones con distinto grado de deterioro para comparación visual. Si bien en todas las probetas se realizan 10000 ciclos de pasaje de rueda, en el caso de la probeta 11-S se decide continuar con la finalidad de observar este deterioro, pero como muestra en la Figura 4-37 solo se ha producido desplazamiento de la pintura por efecto de la temperatura y cambio de dirección de la rueda. Sin embargo, aunque no hemos observado esa falla, vemos que todos los resultados están relacionados con las imágenes y que resulta útil la comparación de las mismas, así como, la observación en lupa.

4.5 Evaluación de la abrasión de los materiales utilizados para demarcación vial

4.5.1 Ensayo Taber Abraser

Metodología

Se evalúa la resistencia a la abrasión con la utilización del equipo denominado *Taber Abraser* que se describe en el Capítulo 3. En esta experiencia, se usan ruedas abrasivas CS-10 con una carga cada una de 500 g. Para el ensayo, se utilizan chapas de 10 cm de lado sobre las que se aplican cada una de las pinturas en estudio. La imagen derecha de la Figura 4-15 presentada en el aspecto visual (inciso 4.3.4.3) corresponde a las probetas preparadas para realizar este ensayo (se puede observar que las muestras presentan una perforación central).

Las muestras se mantienen 24 horas en condiciones de 25°C y luego se colocan las mismas en estufa a 40 °C durante 168 horas previo al ensayo. Este procedimiento se mantiene en todos los ensayos de abrasión con la finalidad de lograr las mismas condiciones previas al ensayo. Los ciclos y la determinación de los valores se realizan siguiendo los lineamientos de la Norma UNE 135203-1/2010. En la Figura 4-39 se

presenta el equipo utilizado para el ensayo de los materiales que se encuentra en el INIFTA de La Plata.

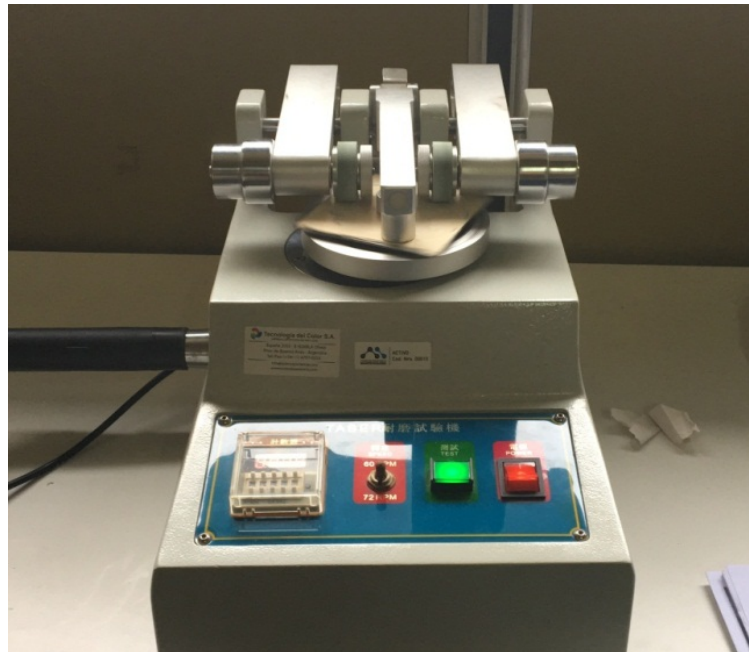


Figura 4-39. Equipo Taber Abraser

Fuente: elaboración propia

El procedimiento realizado consiste en determinar el peso inicial de cada una de las probetas, P_0 . Posteriormente se coloca la probeta sobre el plano giratorio y se baja el brazo de la unidad abrasiva hasta poner las ruedas en contacto con la superficie del material, ajustando las boquillas de aspiración. De esta forma, iniciando el contador en 0, se pone en marcha la unidad de aspiración hasta cumplir 100 ciclos. Se limpia la probeta con pincel y se pesa, obteniéndose P_1 . Luego, se reitera este proceso hasta cumplir nuevamente 100 ciclos y se vuelve a pesar, P_2 . Finalmente, se realizan 100 ciclos más obteniéndose P_3 . Para la determinación del Índice de Abrasión (I_a) se utiliza la Ecuación 4-3.

$$I_a = \frac{(P_1 - P_3) \times 1000}{200} \quad (4-3)$$

Donde:

- I_a = Índice de abrasión (mg)
- P_1 = Peso de la probeta luego de 100 ciclos de ensayo (mg)
- P_3 = Peso de la probeta luego de 200 ciclos de ensayo adicionales (mg)

Resultados y discusión del ensayo *Taber Abraser*

Se realizan 3 ensayos de cada pintura, obteniéndose como resultado que la pintura base solvente S1 presenta un I_a promedio de 103 mg, con un desvío de 14 mg, y la pintura acuosa A1 obtiene un índice de 91 mg, con un desvío de 12,7 mg. Por otro lado, las otras pinturas base acuosa obtienen valores menores, así la pintura A2 obtiene un índice de 42 mg, con desvío de 2 mg, y la pintura A3 un índice de 55,7 mg, con desvío de 3,2 mg. Se destaca que la pintura S1 y A1 tienen una baja resistencia a la abrasión comparadas con los otros materiales. Asimismo, estos valores son similares a los que Fatemi et al. (2006) obtiene en las muestras con peor comportamiento en el mismo ensayo realizado para su trabajo.

Además, debido a que se pesa luego de cada ciclo es posible analizar la variación de la pérdida de peso cada 100 ciclos de abrasión. En la Figura 4-40 se observa que, en este caso existen dos pendientes bien diferenciadas en la que coinciden las muestras que tienen distinto tipo de resina en la conformación.

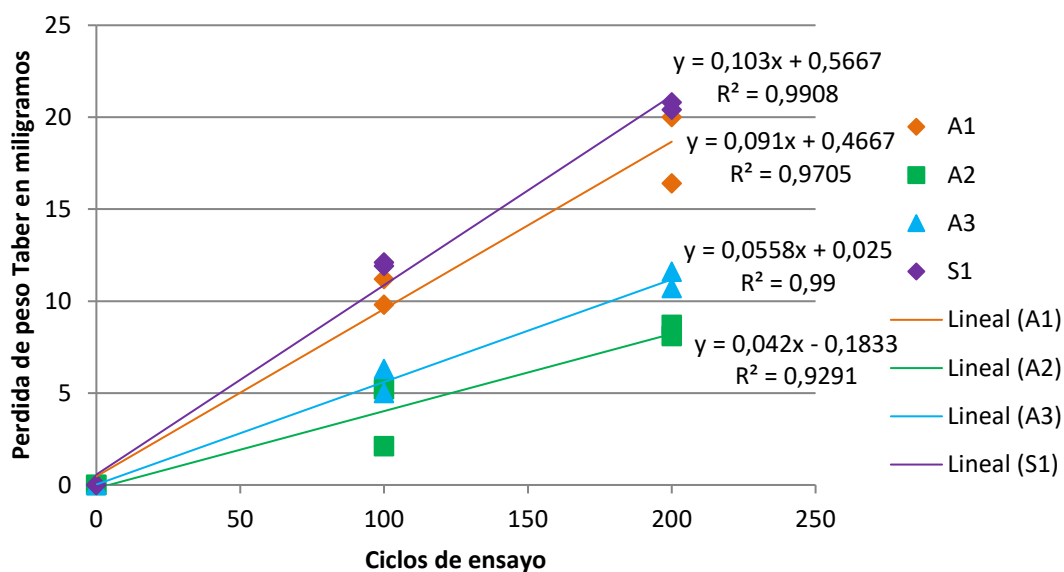


Figura 4-40. Variación de la pérdida de peso en el ensayo *Taber Abraser*

Fuente: elaboración propia

En resumen, con este ensayo se observa que las muestras que mejor comportamiento tienen son las acrílicas puras. Esto se debe a dos motivos, primero que el mayor contenido de sólidos de las pinturas formuladas con resinas acrílicas puras lleva a la formación de películas más robustas que las de las pinturas formuladas con resinas acrílicas estirenadas. Y, en segundo lugar, según Di Crescenzo et. al (2014) las resinas

acrílicas estirenadas presentan, en general, un peor comportamiento en ensayos de envejecimiento.

Mediante el análisis de los resultados obtenidos en el *Taber Abraser* con pinturas de demarcación vial se puede concluir que, al igual que en otros tipos de pinturas, se comportan mejor las resinas acrílicas puras en ensayos que implican una degradación física.

4.5.2 Ensayo de abrasión por vía húmeda WTAT

Se implementan dos metodologías con la utilización del ensayo WTAT: en el primer caso se realiza el ensayo de abrasión por vía húmeda sobre un sistema de demarcación horizontal compuesto por la pintura base solvente S1 con el agregado de microesferas de sembrado con la finalidad de evaluar la degradación de la retroreflexión. Por otro lado, en el segundo caso, se utilizan los materiales base (solo pintura) aplicados sobre una chapa para evaluar la pérdida de peso.

4.5.2.1 Ensayo de abrasión por vía húmeda WTAT de un sistema de demarcación horizontal

Metodología

Con este ensayo de abrasión se pretende evaluar la evolución de las propiedades esenciales con la finalidad de evaluar la adherencia de las microesferas a la pintura. Para ello, se utiliza una chapa circular sobre la que se vuelca la pintura S1 con el agregado de microesferas de premezcla P en una dosificación de 300 g/l de pintura. Es decir, se incorporan 16,2 g de microesferas en 54 ml de pintura. Es importante mencionar que este procedimiento se realiza antes del diseño de la barra de aplicación, por ello, se utiliza el pincel para distribuir la pintura. Posteriormente se siembran microesferas TAF-S2 con la dosificación de 500 g/m² (45 g) sobre la superficie. En la Figura 4-41 se presenta la secuencia enunciada para pintar la muestra.



Figura 4-41. Preparación de la muestra para el ensayo de abrasión por vía húmeda

Fuente: elaboración propia

Luego se evalúan los parámetros iniciales: resistencia al deslizamiento con el péndulo inglés TRRL (Figura 4-42), retroreflexión RL_{30} y luminancia Q_d con un retroreflectómetro portátil (Figura 4-43) y observación de la superficie con la lupa binocular Olympus SZ61 del LEMaC (Figura 4-44).



Figura 4-42. Evaluación de la resistencia al deslizamiento para el ensayo WTAT

Fuente: elaboración propia



Figura 4-43. Evaluación de los parámetros con un retrorreflector portátil

Fuente: elaboración propia

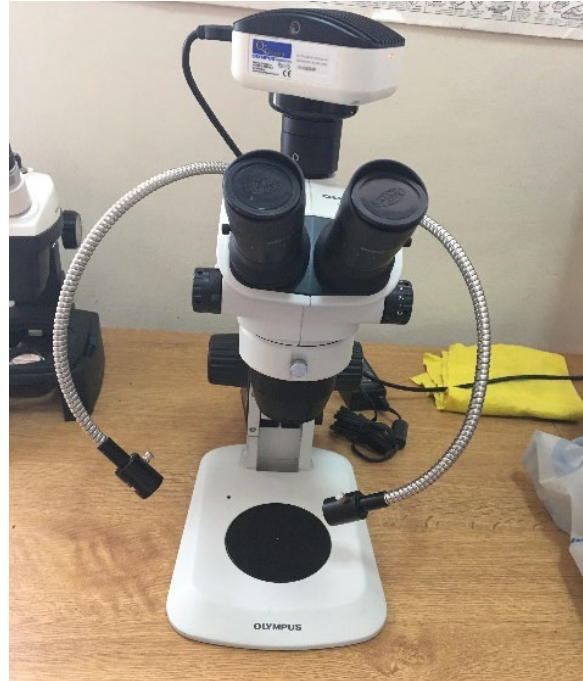


Figura 4-44. Lupa binocular Olympus SZ61 del LEMaC

Fuente: elaboración propia

El ensayo de abrasión se realiza en el equipo descrito en el Capítulo 3. En un principio, se coloca la muestra en una bandeja con un baño de agua, con una lámina de por lo menos 6 mm de agua por encima, por un período de 1 hora. Transcurrido este lapso, se enciende la máquina y se mantiene en funcionamiento por 5 minutos. En la Figura 4-45 se muestra la probeta durante el ensayo.



Figura 4-45. Ensayo WTAT por vía húmeda

Fuente: elaboración propia

Terminado el ensayo, se evalúan los parámetros mencionados inicialmente, es decir: retrorreflexión $RL30$, luminancia en iluminación difusa Qd , resistencia al deslizamiento y observación en lupa y se procesan. El procedimiento de ensayo y medición se reitera 2 veces manteniéndose el tiempo de ensayo mencionado de 5 minutos.

Resultados y discusión del ensayo de abrasión por vía húmeda WTAT de un sistema de demarcación horizontal

En la Figura 4-46 se presentan los resultados de los parámetros evaluados luego de cada ensayo. Los mismos son: $RL30$, Qd y resistencia al deslizamiento. Es importante mencionar que los valores de $RL30$ y Qd se obtienen de realizar el promedio de 4 valores medidos con el Retrorreflectómetro portátil en cada instancia de evaluación luego de los respectivos ensayos. Para la evaluación de la resistencia al deslizamiento se sigue, al igual que en la evaluación del ensayo WTT, el procedimiento indicado en la norma IRAM 1555/1998 aplicado a marcas viales.

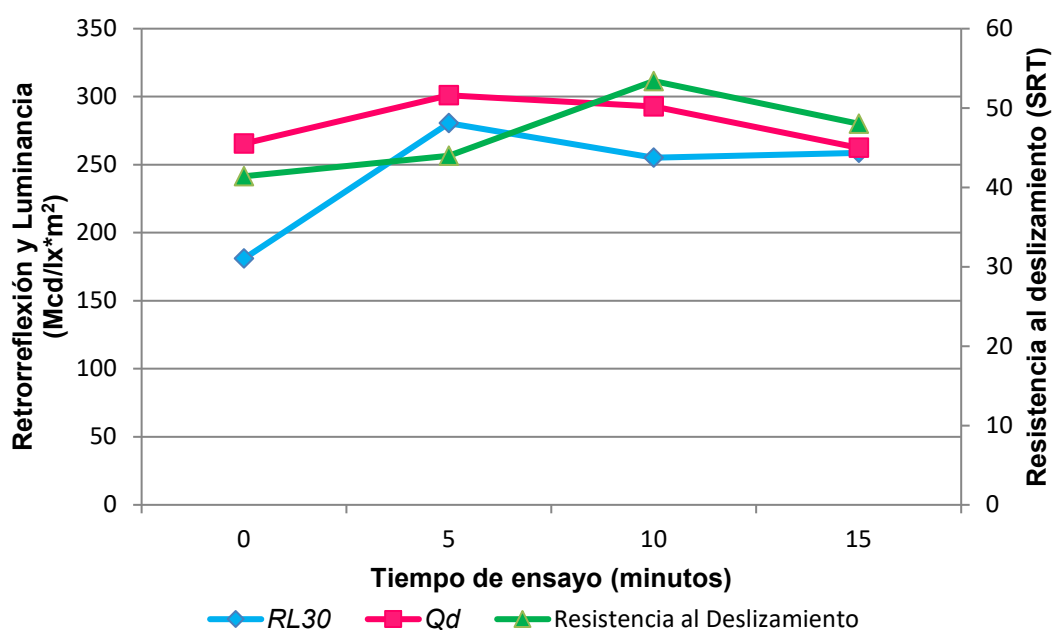


Figura 4-46. Resultados de $RL30$, Qd y resistencia al deslizamiento en cada una de las instancias del ensayo WTAT

Fuente: elaboración propia

Se observa que la luminancia y la retrorreflexión tienen un aumento de los valores en los primeros 5 minutos de ensayo, pero luego disminuyen. Este aspecto en $RL30$, está relacionado con el patrón presentado en la Figura 2-16 del Capítulo 2, que representa el deterioro de la retrorreflexión de una marca vial recién aplicada. Inicialmente la

retroreflexión aumenta hasta un valor máximo debido al exceso de microesferas que cubren a las que están ancladas o, por las que están poco ancladas y son removidas por efecto de la abrasión. Luego se produce una disminución en función del tiempo, que en nuestro caso se mantiene en valores similares, pero se debe considerar que el período de tiempo de ensayo son 20 minutos en total.

Similarmente con la luminancia se observa un aumento significativo luego del primer ensayo, esto es posible justificarlo debido a que la alta dosificación de microesferas conduce a un oscurecimiento de las pinturas. Al realizar el ensayo de abrasión, la superficie pierde gran cantidad de microesferas, generando que la misma quede con un aspecto más blanco. En los ensayos posteriores se observa que el valor deja de aumentar comenzando a descender en forma paulatina.

Asimismo, vemos que la resistencia al deslizamiento también incrementa con el tiempo. Como se menciona en el Capítulo 2, no siempre es posible conseguir una alta resistencia al deslizamiento y una alta retroreflexión. Un aumento en la cantidad de microesferas en la demarcación puede contribuir a una mayor retroreflexión y una menor resistencia al deslizamiento. Como se mencionara, la probeta, al inicio, contaba con una gran cantidad de microesferas que, al desprenderse, genera una superficie más rugosa y se espera que aumente la resistencia al deslizamiento.

En la Figura 4-47 se presentan las fotografías obtenidas con la lupa binocular Olympus SZ61 del LEMaC. Es preciso aclarar que por inconvenientes con el *software* las imágenes se ven con distinta iluminación. De todas formas, haremos hincapié en la distribución de las microesferas.

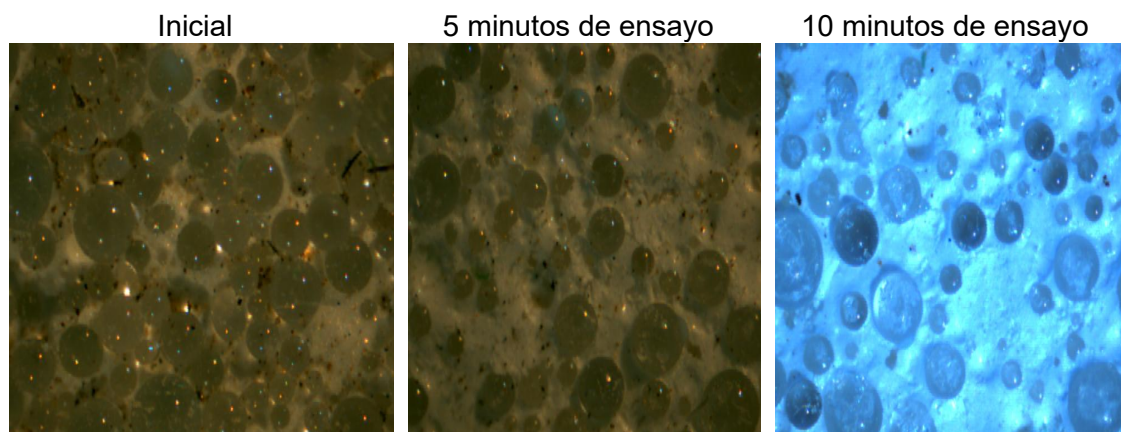


Figura 4-47. Vista en lupa de la probeta ensayada en distintas instancias

Fuente: elaboración propia

En la Figura 4-48 se muestra la secuencia de fotos tomadas en la cabina de evaluación visual que se detalla en el Anexo A. Como se hizo en el caso del ensayo con el equipo WTT, se toman dos fotos distintas: una de ellas con la luz encendida simulando la luz de día sin activar el *flash* de la cámara (Figura 4-48-A). En cambio, la segunda foto, es tomada con la luz apagada y el *flash* encendido para poder observar el efecto de las microesferas (Figura 4-48-B). En la muestra inicial la foto no se toma en la cabina mencionada debido a que la misma es construida con posterioridad.

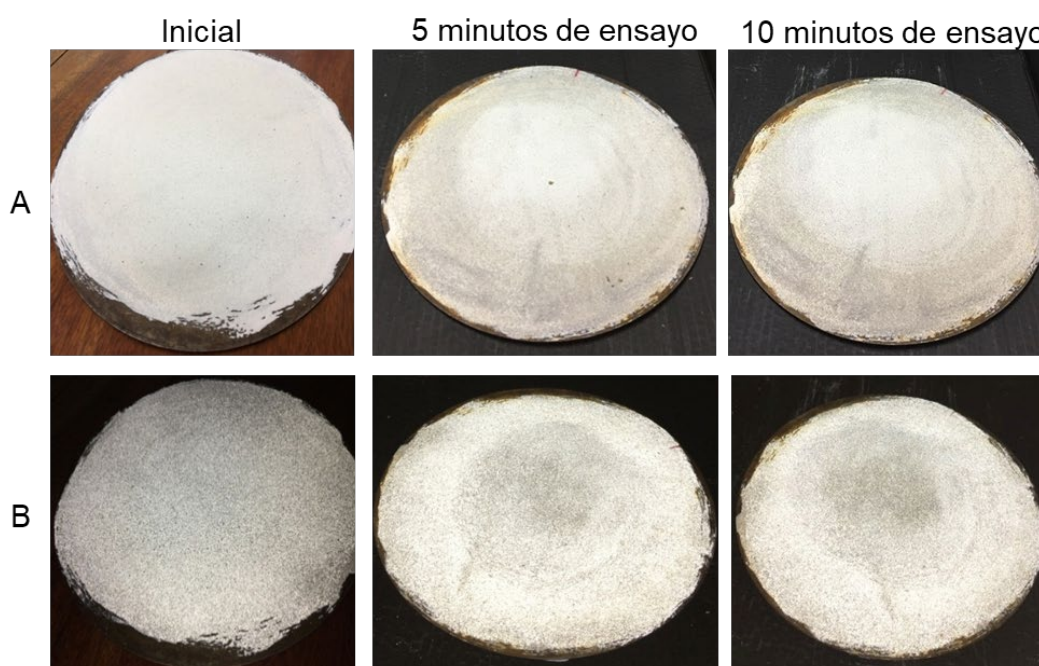


Figura 4-48. Foto de la probeta en la cabina. A: cabina iluminada sin flash en la cámara. B: cabina sin iluminación con flash activado en la cámara

Fuente: elaboración propia

Relacionando las imágenes y los resultados obtenidos con el Retrorreflectómetro, se observa que el ensayo provoca la pérdida de las microesferas, pero que aún existen una cantidad considerable de las correspondientes al sembrado. Calavia (1995) resalta la importancia del espaciamiento entre microesferas para evitar que unas no estorben con las otras. De esta forma, se evidencia que inicialmente existía una sobredosificación de las microesferas y, al ensayar las probetas se desprenden gran parte de las microesferas. Se elimina así, la interferencia que se genera entre ellas mismas, aumentándose como consecuencia la retroreflexión. En cambio, luego de los 5 minutos adicionales de ensayo se observa una disminución de dicho valor. Adicionalmente, en la Figura 4-47, se puede observar el efecto del desprendimiento de las microesferas que

genera una superficie más áspera. Efecto que es plasmado en los resultados de resistencia al deslizamiento.

4.5.2.2 Ensayo de abrasión por vía húmeda WTAT de los materiales base

Metodología

Para llevar a cabo el ensayo se utilizan chapas lisas cincadas cuadradas de dimensiones de 30 cm de lado con un recorte en una esquina. Sobre las mismas se pinta con la barra de aplicación que se detalla en el Anexo A de forma de obtener un espesor uniforme del orden de 600 μm en húmedo (Figura 4-49). Para realizar un curado comparable en los ensayos de abrasión se dejan secar las probetas en condiciones a 25°C por un período de 24 horas y, luego se colocan las muestras en cámara a 40 °C durante 168 horas.

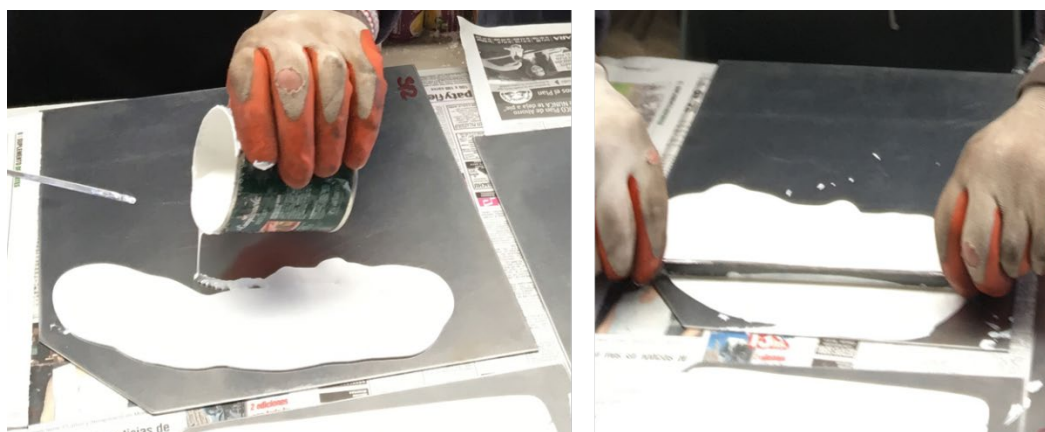


Figura 4-49. Pintado de las Probetas para el ensayo WTAT

Fuente: elaboración propia.

Se obtiene el peso inicial (P_a) y se procede a realizar el ensayo en el equipo, descrito en el Inciso 3.5.2, dejando previamente en reposo la muestra sumergida en agua durante 1 hora, para luego proceder a ensayar por un período de 20 minutos. Las probetas ensayadas se llevan a la cámara con recirculación de aire por un período de 24 horas a 40 °C y se registra el peso luego del ensayo (P_d).

Finalmente, se calcula la pérdida de peso por abrasión PA (g) según la ecuación (4-4).

$$PA = (P_a - P_d) \quad (4-4)$$

Donde:

- PA = Pérdida de peso por abrasión (g)
- P_a = Peso inicial de la probeta pintada (g)
- P_d = Peso de la probeta luego del ensayo (g)

En la Figura 4-50 se presentan las imágenes de una muestra de cada una de las pinturas aplicadas.

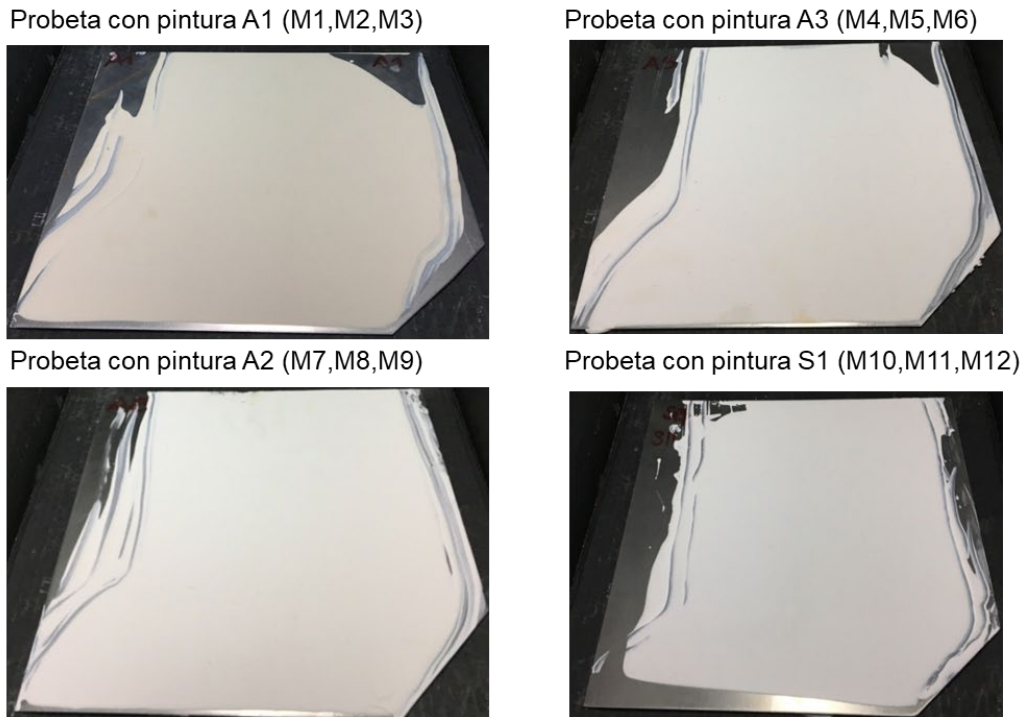


Figura 4-50. Probetas de chapa donde se aplicaron los distintos tipos de pintura

Fuente: elaboración propia

Inicialmente, previo al desarrollo de este procedimiento con las condiciones de curado indicadas, se hacen ensayos con distintas condiciones de curado de la pintura. Con la finalidad de evidenciar este aspecto y las diferencias halladas, se presentan todas las condiciones evaluadas.

Resultados y discusión del ensayo de abrasión por vía húmeda WTAT

La Tabla 4-8 presenta los valores de pérdida de peso promedio de cada material (PA) obtenidos en las distintas condiciones de curado. Como se comenta en el párrafo anterior, se agregan las condiciones de curado consideradas al inicio de los ensayos con el fin de evidenciar el efecto de la temperatura en las pinturas. Para justificar la

relación entre los valores se recurre a la estadística con el cálculo de la desviación estándar y el coeficiente de variación (CV).

Tabla 4-8. Valores de pérdida de peso de los materiales
Fuente: elaboración propia.

MATERIAL	PROMEDIO (g)	DESVÍO (g)	COEFICIENTE DE VALORACIÓN (%)	DESCRIPCIÓN DE CURADO
A1	1,2	0,34	28	Probetas ensayadas luego de 1 día en condiciones de temperatura ambiente (junio)
	0,72	0,07	10	Curadas en condiciones de temperatura ambiente (julio)
	0,57	0,05	9	Curadas en cámara a 40°C durante 168 horas
A2	0,31	0,06	21	Curadas en condiciones de temperatura ambiente (julio)
	0,49	0	0	Curadas en cámara a 40°C durante 168 horas
A3	0,6	0,2	33	Curadas en condiciones de temperatura ambiente (julio)
	0,28	0,09	32	Curadas en cámara a 40°C durante 168 horas
S1	0,38	0,32	85	Probetas ensayas luego de 1 día en condiciones de temperatura ambiente (junio)
	0,08	0,01	18	Curadas en condiciones de temperatura ambiente (julio)
	0,14	0,16	113	Curadas en cámara a 40°C durante 168 horas

En la Figura 4-51 se presentan los valores en un gráfico de barras que permite evidenciar la diferencia de pérdida de abrasión en las distintas condiciones de curado.

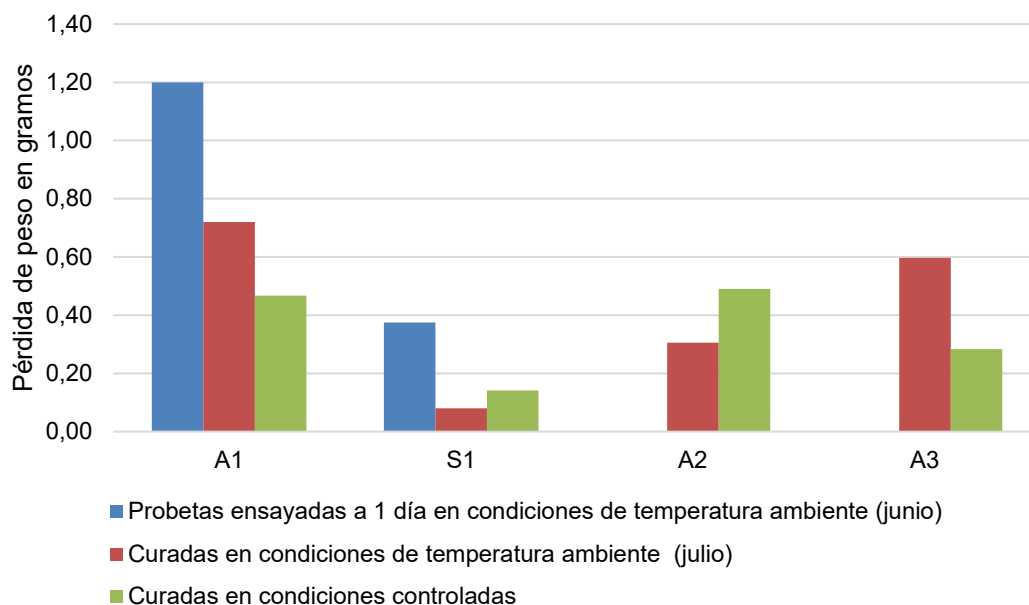


Figura 4-51. Pérdida de peso en el ensayo WTAT en distintas condiciones de humedad y temperatura. Fuente: elaboración propia

Como se observa en la Tabla 4-8 y en la Figura 4-51 en este ensayo no se ha obtenido un comportamiento homogéneo ya que se presentaron valores variables entre los mismos materiales. De todas formas, de la Figura 4-51 se evidencia claramente que, si bien los materiales han curado, es sumamente importante la condición de humedad y temperatura ambiente condicionando la respuesta frente a la abrasión, sobre todo en húmedo. Si bien parece algo lógico, se destaca que en la demarcación horizontal no es posible realizar un curado en condiciones controladas ya que la aplicación se realiza en las rutas.

De los resultados se observa que, en las condiciones de curado indicadas (cámara a 40 °C durante 168 horas), la que ha tenido el mejor comportamiento en este ensayo es la pintura base solvente S1 con una pérdida de peso por abrasión de 0,14 g y, la de peor comportamiento en las condiciones mencionadas es la pintura A1 que presenta una pérdida promedio de 0,57 g, acompañada por la pintura A2 con una pérdida de 0,49 g en promedio. Es importante resaltar que, si bien la de menor pérdida de peso por abrasión es la pintura base solvente, la misma presenta una gran dispersión en los valores observados. Si bien la mayoría tiene valores de pérdida de peso de 0,03 g a 0,12 g, una de ellas presenta una pérdida de 0,42 g. Debido a las dimensiones de las probetas los pesos se realizaron con precisión de décimas y no centésimas como en el caso de los otros ensayos de abrasión.

En la Figura 4-52, se muestra el agua de ensayo de las probetas, luego de finalizado el ensayo WTAT, realizado sobre probetas curadas en cámara a 40 °C. De la observación visual sobre lo sucedido se piensa que este fenómeno puede darse por la diferencia en la formación de la película seca debido a que las pinturas base acuosa secan por coalescencia y las pinturas base solvente por simple evaporación. Esto es debido a la pérdida del material formador de película que al quedar disperso en el agua del ensayo hace que la misma quede con aspecto blanquecino.

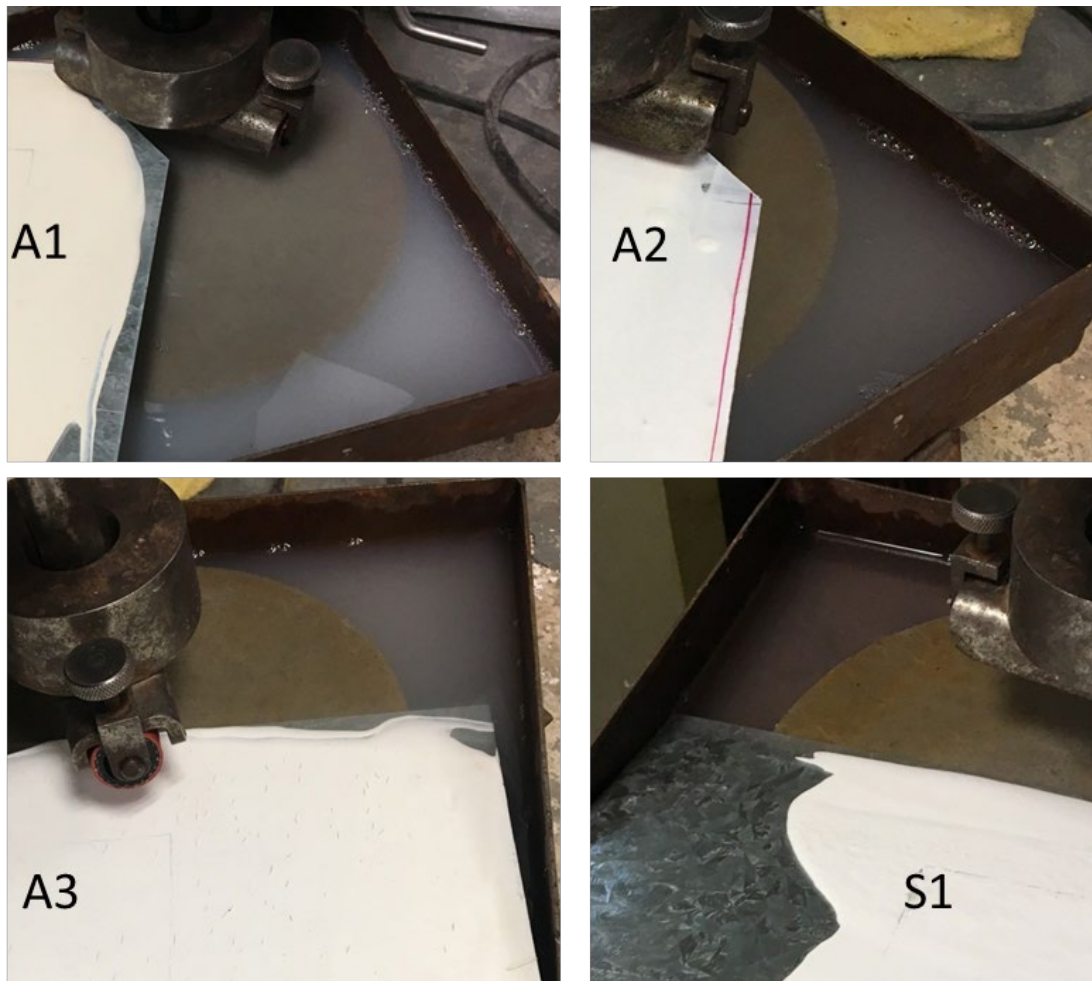


Figura 4-52. Imágenes del aspecto del agua luego del ensayo WTAT

Fuente: elaboración propia

4.5.3 Pulimento Acelerado

Metodología

Otro de los equipos implementados en la tesis, es el Pulimento Acelerado que se presenta en el Capítulo 3 (Figura 3-12). Como se menciona, se concluye que el sustrato óptimo se obtiene al utilizar resinas epoxídicas en gel, Figura 4-53.

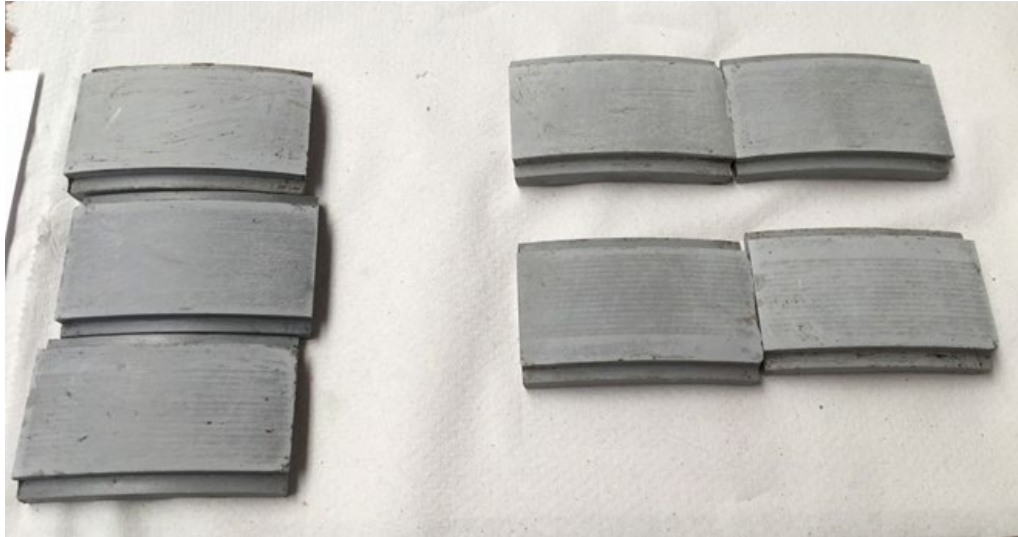


Figura 4-53. Sustratos para aplicación de pintura

Fuente: elaboración propia

Sobre el sustrato cuyo peso registrado es P_0 , se aplican las pinturas mencionadas y se colocan en ambiente a 25° C por un período de 24 horas. Luego se acondicionan en una cámara a 40 °C por un período de 7 días, Figura 4-54.



Figura 4-54. Acondicionamiento de las muestras en cámara

Fuente: elaboración propia

Una vez finalizado el tiempo de curado se registra el peso P_1 y se procede a tomar las imágenes de cada una de las muestras en la Cabina portátil de inspección visual que se describe en el Anexo A, Figura 4-55.



Figura 4-55. Cabina portátil utilizada para comparación visual

Fuente: elaboración propia

Luego, se colocan las probetas en la rueda de ensayo, Figura 4-56, y se procede a ensayar las mismas por un período de 4 horas. Luego del ensayo, se dejan secar las probetas por 24 horas en la cámara mencionada a 40 °C y se registra el peso P_2 .



Figura 4-56. Rueda de ensayo donde se colocan las probetas

Fuente: elaboración propia

Todos los pesos registrados son obtenidos con una balanza de precisión como se muestra en la Figura 4-57.

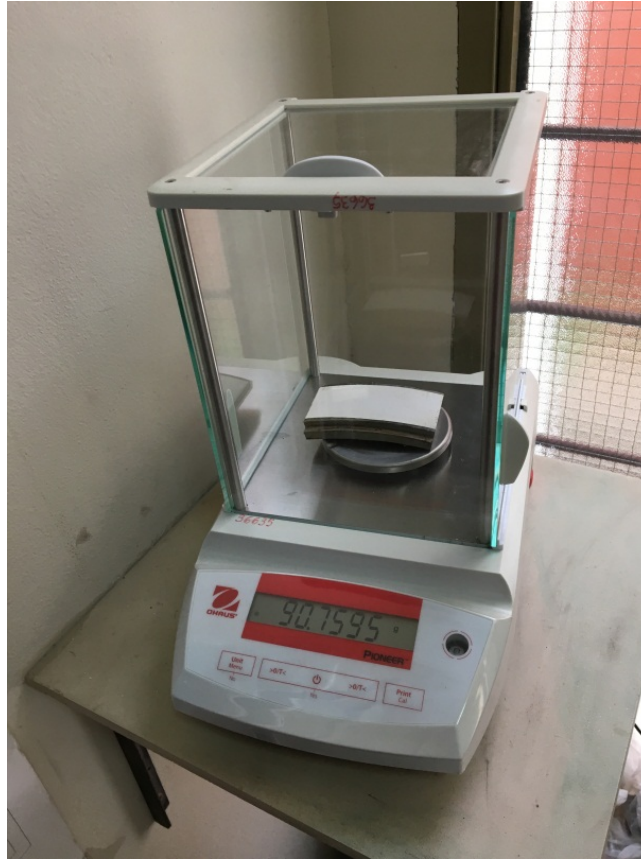


Figura 4-57. Balanza de precisión para registrar el peso de las probetas
Fuente: elaboración propia

Se calcula la pérdida de peso en gramos correspondiente a 4 (cuatro) horas de ensayo según la Ecuación (4-5).

$$PP = (P_1 - P_2) \quad (4-5)$$

Se destaca que los resultados son presentados en miligramos con el fin de poder compararlos con los resultados del *Taber Abraser*. Además, para representar los datos de pérdida de peso de cada uno de los materiales se recurre a la estadística promediando los mismos y calculando la desviación estándar.

Resultados y discusión

La Figura 4-58 presenta el gráfico con los resultados de pérdida de peso (mg) obtenidos con el equipo de Pulimento Acelerado sobre las muestras ensayadas. Se puede observar que en la mayoría de los casos los valores se encuentran por debajo de 150 miligramos y solo en dos casos fue superado dicho valor.

Se destaca que, si bien en las muestras 7 a 15 se aplicó la pintura S1 por *spray* con microesferas sembradas, los valores obtenidos se mantienen dentro del mismo rango que para el mismo material aplicado con pincel sin microesferas, mostrando independencia del tipo de aplicación. Es importante aclarar que, previo al pesaje inicial, las probetas con microesferas sembradas son limpiadas suavemente con cepillo para eliminar las que no estuvieran adheridas y que podrían producir errores en las lecturas. Se observa idéntico comportamiento en el caso de la pintura A3. Las muestras aplicadas por *spray* (6, 7, 8, 9 y 10) arrojaron valores que se mantienen dentro del mismo rango de las que son aplicadas con pincel.

De esta forma, se puede inferir que el resultado del desgaste es independiente del método de aplicación (pincel o *spray*) y es una propiedad del tipo de resina en la formulación de la pintura.

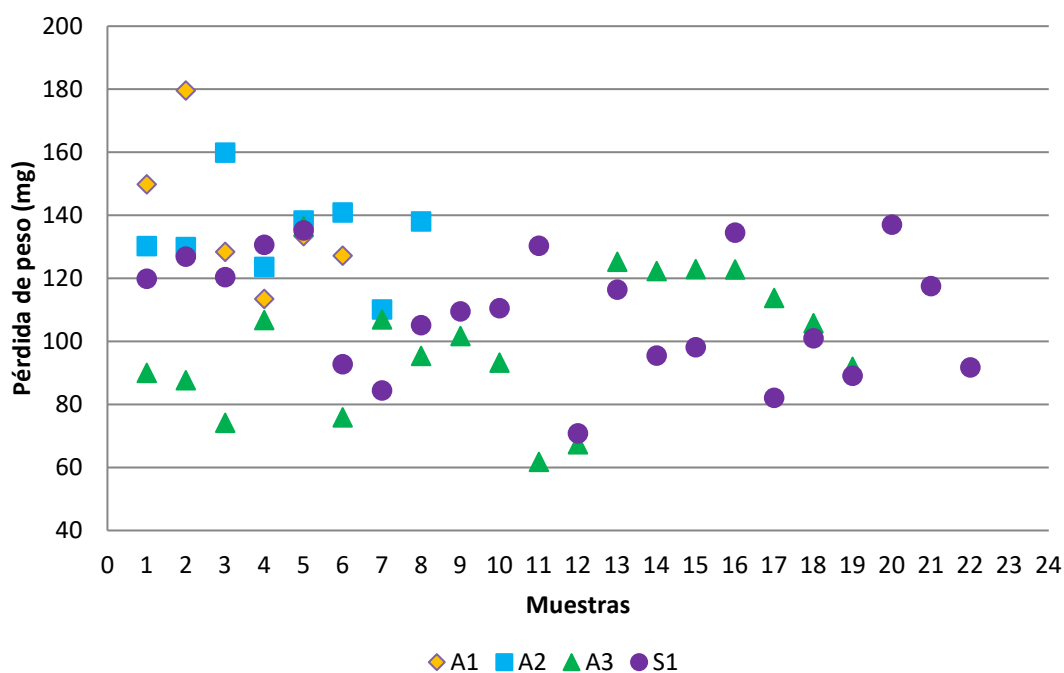


Figura 4-58. Variación de la pérdida de peso de pintura luego del ensayo

Fuente: elaboración propia

Por otro lado, de los datos obtenidos se puede observar que la pintura A3 es la que obtiene menor pérdida de peso por abrasión, con un valor promedio de 100,14 mg, compatible con lo que se espera por ser una pintura en emulsión con resina acrílica pura. Las pinturas formuladas con resinas acrílicas estirenadas (A1 y S1) obtienen una pérdida de peso mayor. Así, la pintura base solvente (S1) mostró una pérdida promedio de 109,54 mg y la pintura base acuosa A1 de 138,67 mg, siendo la que peor comportamiento presenta en este ensayo. Por otro lado, la pintura A2 tampoco tiene un comportamiento satisfactorio en este ensayo, con una pérdida de peso promedio de 133,94 mg, a pesar de estar conformada con la misma resina que la pintura A3. Es preciso aclarar que, en este último caso es un material recomendado principalmente para trabajos de repintado de marcas viales. Se destaca que los valores considerados corresponden a 82320 pasos de rueda sobre cada muestra, calculados luego de considerar el tiempo de ensayo y las características del equipo.

Por otra parte, en la Figura 4-59 se presenta una comparación de la pérdida de peso en mg relacionada al peso de pintura aplicado de la misma muestra. Se resalta que, a pesar de que en algunos casos se agrega mayor cantidad de pintura, la pérdida de peso se mantiene en valores similares.

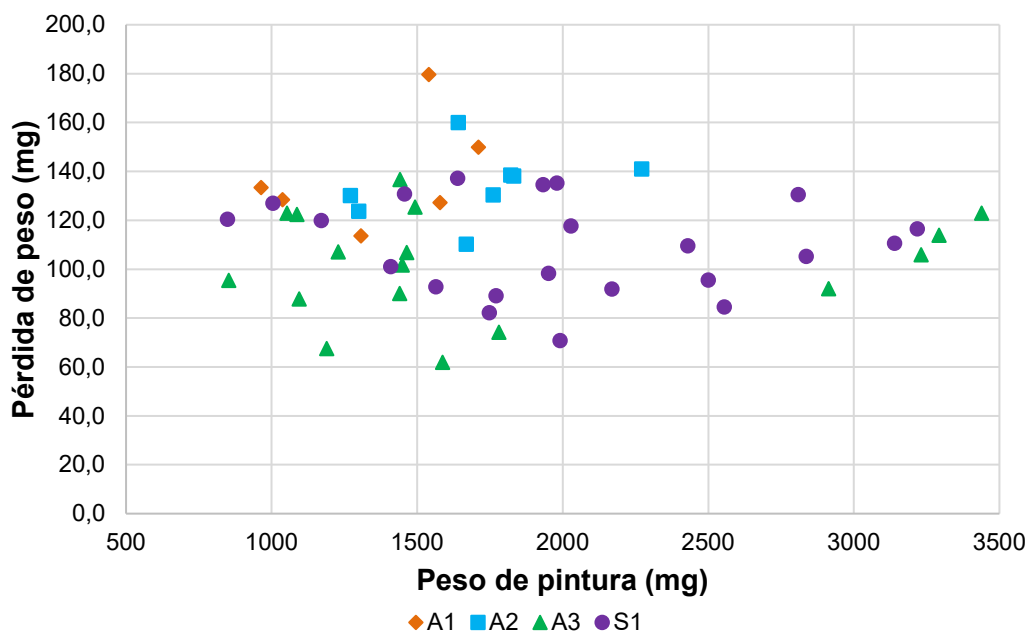


Figura 4-59. Variación de la pérdida de peso de pintura luego del ensayo de Pulimento Acelerado con respecto al peso de pintura aplicado en cada muestra

Fuente: elaboración propia

De la observación visual de las probetas durante el ensayo puede comprobarse que las películas de pintura base acuosa A3, y también (aunque en menor medida) las de la pintura A2, no presentan buena adherencia al sustrato. Para cuantificar esto, se evalúa la cantidad de muestras que presentan desprendimiento de pintura. Es necesario aclarar que los valores son descartados para la consideración de los promedios brindados de pérdida de peso. Se encuentra que, en el caso de la pintura A3 se desprendió en un 41,6 % de los casos. Por otro lado, en el caso de la pintura A2 se realizaron menor cantidad de ensayos, pero se presenta desprendimiento en un 25 % de casos. La pintura S1 presenta desprendimiento de pintura en un 4,8 % de los casos. Se destaca que la pintura A1 no presenta desprendimiento en los ensayos realizados (aunque se observa una alteración del color en su almacenamiento).

Debido a que en este ensayo se pretende evaluar el desgaste de los materiales por el paso del tránsito y el efecto del agua, se recomienda, en futuros trabajos, evaluar la adherencia con el sustrato en estudio y descartar los resultados en los que se observe esta falla en la zona de ensayo. Es importante resaltar que las principales fallas de adherencia ocurren cuando se aplica la pintura en los meses de junio y julio, siendo la época en que se producen las temperaturas ambientes más bajas. Considerando que las pinturas secan por coalescencia, éste fenómeno podría estar relacionado con el curado de la película de pintura. Por este motivo, se recomienda, previo a la aplicación de la pintura, registrar la temperatura del sustrato y la temperatura ambiente al momento de la aplicación.

En la Figura 4-60, se muestran imágenes de probetas pintadas con las muestras A2 y A3, luego de ser ensayadas y tomadas en condiciones controladas de iluminación. En las mismas puede observarse la falla antes descrita.

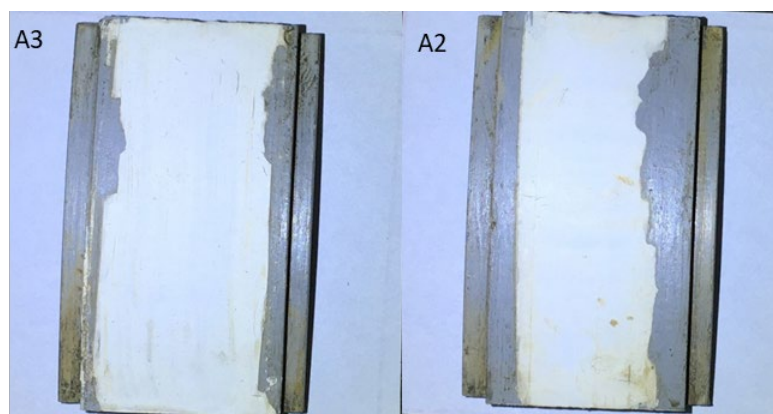


Figura 4-60. Muestras ensayadas con falla de adherencia

Fuente: elaboración propia

Con la misma Cabina portátil para comparación visual, Figura 4-55, se presentan cuatro probetas con cada una de las muestras de pinturas, Figura 4-61. El hecho de tomar imágenes antes y después del ensayo permite justificar, como se ha mencionado, el caso de que se observe una falla o si existe pérdida de la película de pintura, en el cual debe descartarse la muestra correspondiente.

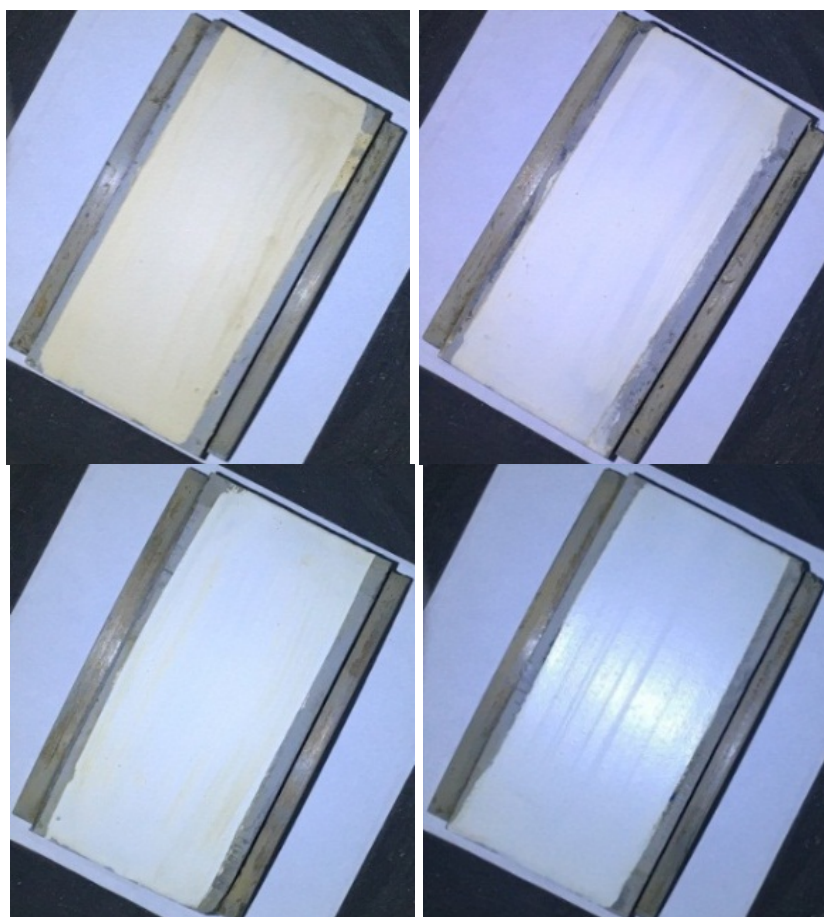


Figura 4-61. Muestras ensayadas por el método de Pulimento Acelerado

Fuente: elaboración propia

4.6 Ensayos complementarios

4.6.1 Absorción de agua

Metodología

Para la evaluación de la absorción, el procedimiento consiste en aplicar la película de pintura sobre una superficie que luego permita independizar a la misma del sustrato

utilizado con la finalidad de que la absorción evaluada sea solo de las pinturas. En la Figura 4-62 se presentan las películas de cada uno de los materiales obtenidos de esta manera.

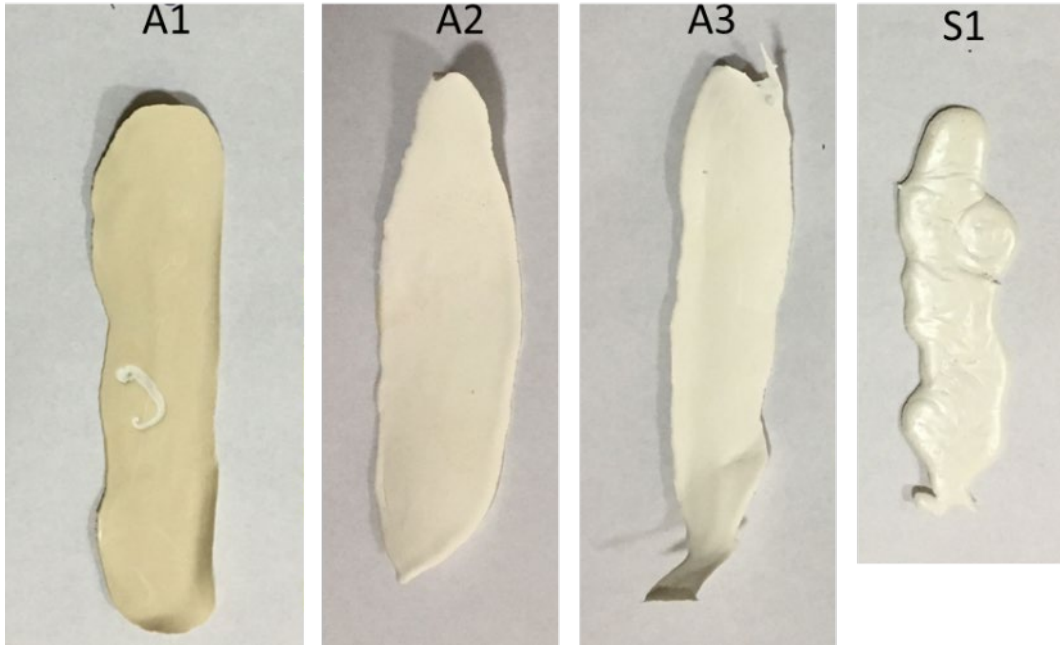


Figura 4-62. Muestras preparadas para el ensayo de absorción de agua

Fuente: elaboración propia.

Luego, se dejan secar por 24 horas en una cámara con recirculación de aire a 40 °C. Se obtiene así el peso P_1 de la película de pintura utilizándose la balanza de precisión, Figura 4-57. Se sumergen las muestras en un recipiente con agua destilada por 24 horas como se presenta en la Figura 4-63.



Figura 4-63. Muestras sumergidas en agua

Fuente: elaboración propia

Se retiran, se secan cuidadosa y superficialmente con un papel de filtro y se pesan obteniendo el peso $P2$ del polímero con agua absorbida. El cálculo de la absorción (A) se realiza según la Ecuación 4-6 (Alonso, 2016).

$$A (\%) = (P2 - P1) / P1 \times 100 \quad (4-6)$$

Como se menciona en el Capítulo 2, se estudia la velocidad de absorción ya que podría ser un criterio importante para evaluar el ensuciamiento de pinturas en la intemperie, debido a que en pocas horas la absorción incrusta la suciedad en la película. Para el cálculo de la velocidad de absorción en las primeras horas de sumergidas las películas de agua, se realiza este procedimiento pesando las muestras en intervalos de 30 minutos durante 3 horas.

Resultados y discusión

Luego de realizar los cálculos, la muestra A1 es la que presenta la mayor absorción de agua con un valor de 11 %. En el otro extremo se encuentra la pintura base solvente S1 con una absorción de 0,6 %. En una posición intermedia se encuentran las otras dos pinturas base acuosa: la A2 con 6 % y la A3 con 3%. Estos resultados son coherentes con lo que se espera, es decir, que las películas más lisas y uniformes presenten un valor menor de absorción. Por otro lado, es de destacar, que la amplitud de valores que presentan las pinturas base acuosa se debe a que el mecanismo de formación de película, de éstas, es más dependiente de las condiciones de aplicación (especialmente temperatura y humedad).

Este resultado demuestra que el comportamiento es similar al observado en el ensayo de absorción detallado en la caracterización de resistencia al ataque químico (inciso 4.3.6). Es evidente que, en aquel caso, los valores son mayores, pero podría deberse a que se realiza por un período mayor de tiempo. Además, en aquel caso, la absorción se realiza con la pintura aplicada en un vidrio.

Por otro lado, en la Figura 4-64 se presenta la variación en la absorción de las pinturas cada 30 minutos durante las tres primeras horas de sumergidas en agua destilada. De la misma, se observa que la pintura A1 es la que presenta una mayor pendiente de la absorción.

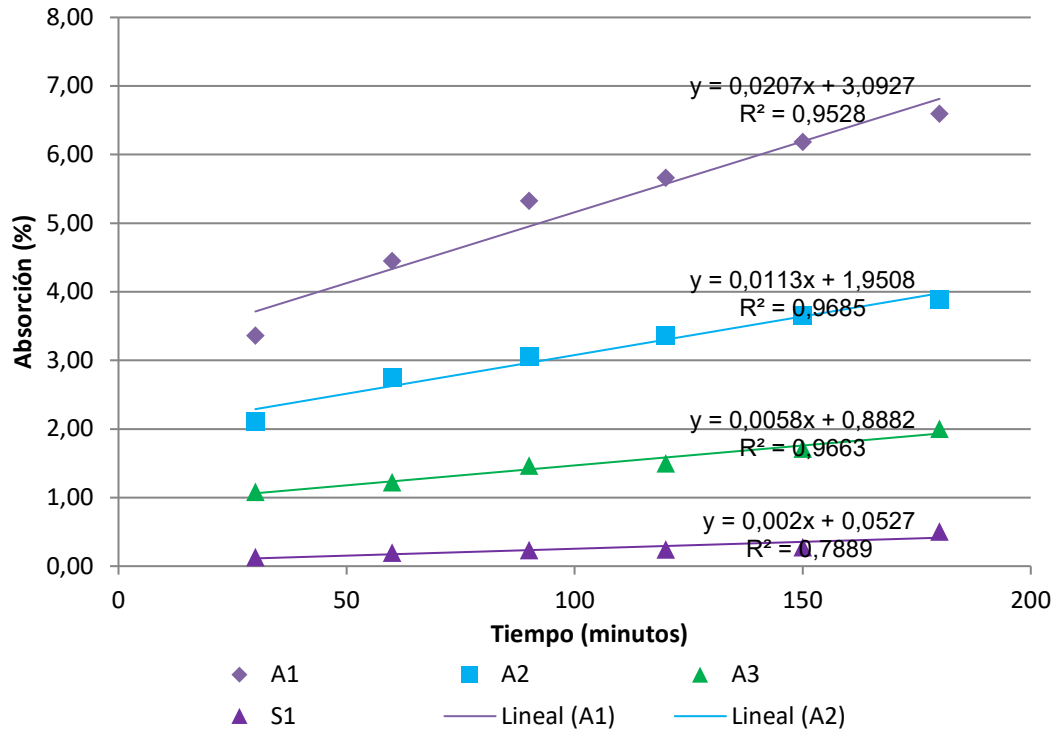


Figura 4-64. Ley de variación de absorción en las primeras horas de ensayo

Fuente: elaboración propia

4.6.2 Comparación visual del ensuciamiento

Metodología

En la búsqueda de un mecanismo que permita comparar la facilidad de ensuciarse de todas las muestras en estudio, se pintan franjas con cada uno de los materiales en una chapa cincada. Para aplicar el material se utiliza el dispositivo de aplicación con manija y se deja a temperatura de 25 °C por 24 horas. Se marcan cuadrados sobre cada una de las muestras de pintura y se toman fotos con la cabina portátil de inspección visual detallada en el Anexo A, Figura 4-65.



Figura 4-65. Toma de imágenes de la muestra para evaluación del ensuciamiento

Fuente: elaboración propia

Luego se colocan las muestras sobre el piso y se coloca alineada una camioneta Chevrolet S10 2.8 tdi 4x2 s/c sobre ellas, Figura 4-66. Se realizan cuatro pasos de la camioneta sobre las muestras y se toman fotos con la cabina portátil de inspección visual al finalizar el ensayo. Luego se limpian las muestras con agua y se toman nuevamente fotos de la misma manera.



Figura 4-66. Prueba de paso de rueda sobre muestras

Fuente: elaboración propia

Resultados y discusión

En la Figura 4-67 se presentan las imágenes de las muestras en estudio que son capturadas inmediatamente después del paso de la camioneta. En la misma se puede observar una importante tendencia a ensuciarse en las pinturas acuosas y una gran diferencia con la pintura base solvente S1 que no es marcada por la rueda. Además, en la Figura 4-68, se muestran las imágenes capturadas de las mismas muestras, pero luego de haber sido lavadas.

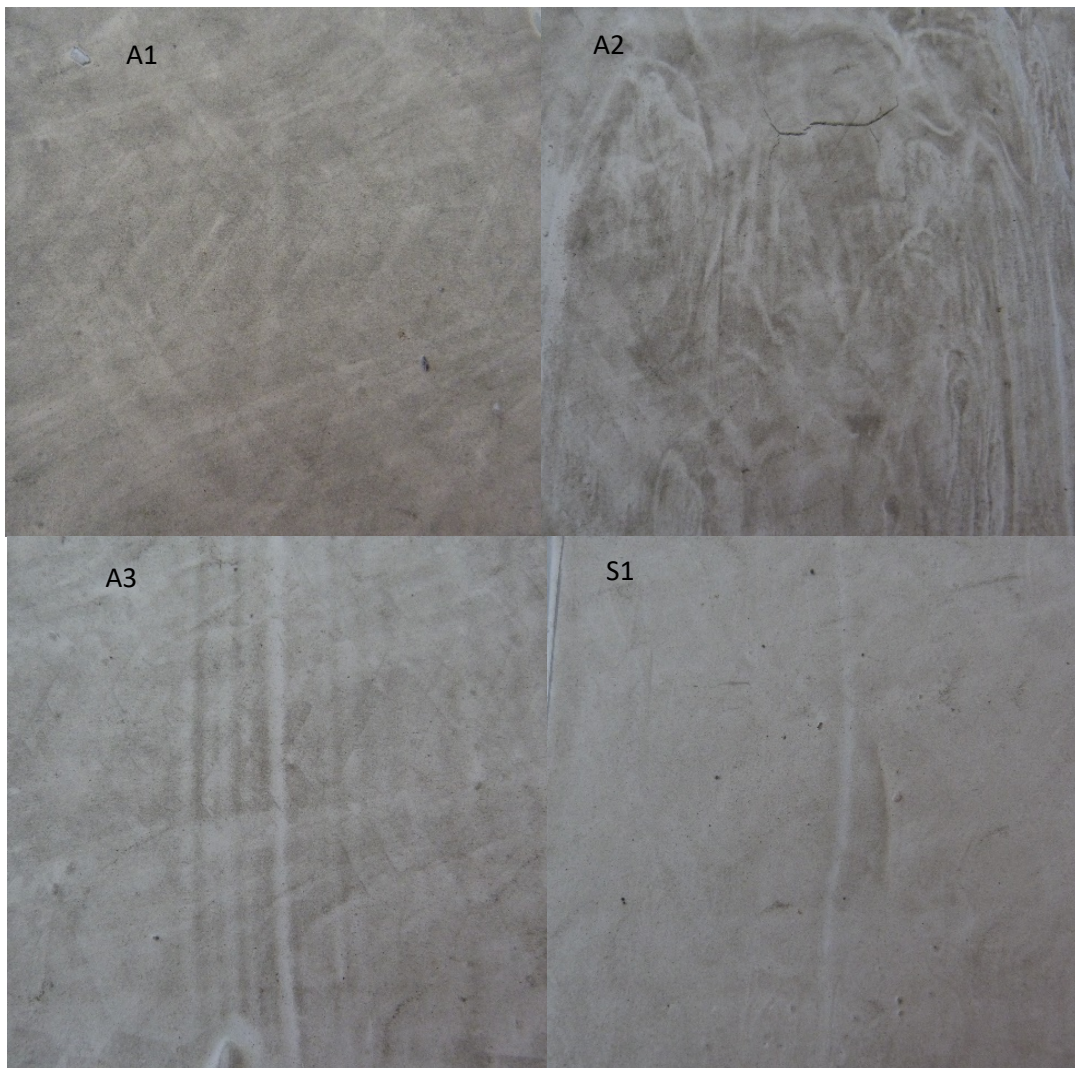


Figura 4-67. Muestras sobre la que se pasaron las ruedas de una camioneta

Fuente: elaboración propia

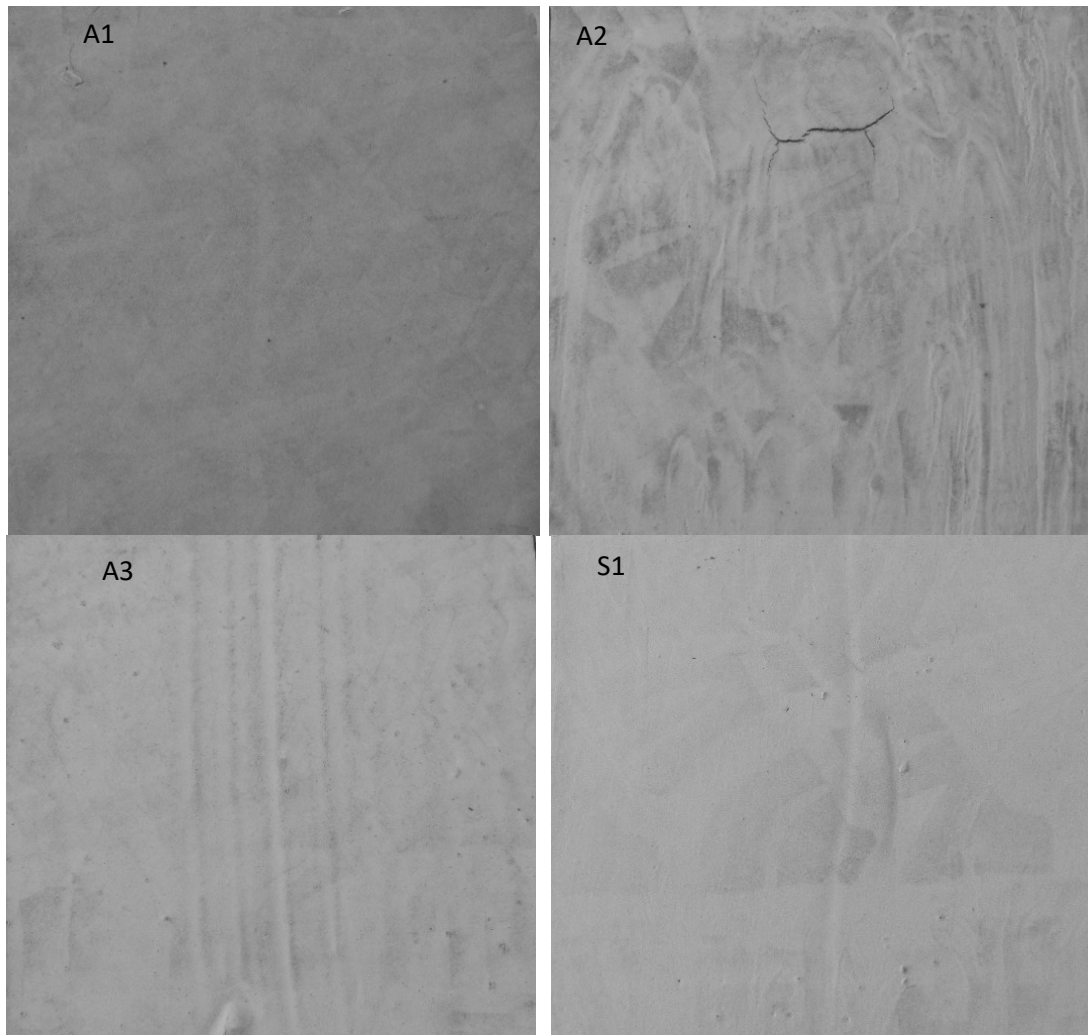


Figura 4-68. Muestras lavadas luego de haber pasado las ruedas de una camioneta

Fuente: elaboración Propia

En congruencia con las imágenes tomadas (Figura 4-67 y Figura 4-68), las pinturas base acuosa que presentan un mayor ensuciamiento, que se evidencia después de lavarlas, son las pinturas A1 y A2 que, a su vez son las que tienen una mayor absorción de agua y presentan una mayor pendiente en la Figura 4-64, es decir mayor velocidad de absorción. La muestra que cumple ambas condiciones, es decir mayor velocidad de absorción inicial y porcentaje de absorción, es la pintura A1 que, en definitiva, es la que se ensucia de forma más pronunciada en las pruebas realizadas. Por otro lado, en el caso de los valores obtenidos en las mediciones de Brillo se observa que existe una relación; pero no es tan evidente, ya que en el caso de las pinturas acuosas todas tienen valores similares.

4.6.3 Ensayo de adherencia

Como se resalta en párrafos anteriores y, principalmente en el Capítulo 1, en el cual se hace hincapié en las características que deben cumplir las marcas viales, los recubrimientos deben adherirse satisfactoriamente al sustrato donde son aplicados. El ensayo de adherencia por tracción, según Norma IRAM 1109 Método B XXII, permite determinar la mínima tensión o fuerza necesaria para desenganchar o romper el recubrimiento en dirección perpendicular al sustrato. Este es el método que se decide implementar para comparar la adherencia de los materiales estudiados con los sustratos que se utilizan en servicio.

Metodología ensayo de Tensión y Adhesión

Se realiza el ensayo de adherencia por tracción con el equipo Positest AT-A de Defelsko de BECHA SA que se muestra en la Figura 4-69 y permite determinar la mínima tensión o fuerza necesaria para desenganchar o romper el recubrimiento en dirección perpendicular al sustrato.



Figura 4-69. Equipo de ensayo de Tensión y Adhesión

Fuente: elaboración propia

Se preparan probetas cilíndricas, tanto de hormigón como de mezcla asfáltica y, se les aplican las pinturas A1, A2, A3 y S1 por pulverización en un espesor de 0,6 mm. Para comparar los resultados para cada una de las pinturas ensayadas se consideran dos casos: en primer lugar, se aplican las pinturas y se adicionan microesferas de mezclado y en el otro caso, solo se utilizan las pinturas. Todas las muestras se curan por un período de 3 días en una cámara a 25 °C. Finalizada esta etapa, se utiliza un adhesivo a base de Ciano acrilato para pegar la pieza de tracción (*Dolly*) perpendicularmente a la

superficie del recubrimiento. Se deja secar a temperatura ambiente por un período de 24 horas. Luego, Se realiza un corte de la película de pintura en torno a la base de la pieza de tracción con el dispositivo del equipo de ensayo, Figura 4-69-A, asegurando que se llega hasta el sustrato. Se ubica la pieza de tracción en el aparato para ensayos de tracción de manera que la fuerza se ejerza en dirección perpendicular al plano de la probeta, Figura 4-69-B, y se aplica la carga aumentando la fuerza tensora hasta lograr el desprendimiento de la pieza. Finalmente se registra el valor de la resistencia a la tracción y se observan las superficies resultantes para determinar el tipo de falla que se denomina “Cohesiva” si la fractura se produce en el revestimiento y “Adhesiva” si se produce desprendimiento del sustrato. En la Figura 4-70, se muestran distintas probetas ensayadas.



Figura 4-70. Presentación de las probetas para el ensayo de adherencia

Fuente: elaboración propia

Para expresar los resultados se realiza el promedio de los valores de cada tipo de falla y se calcula el porcentaje de falla cohesiva y adhesiva en cada caso.

Resultado y discusión

En la Tabla 4-9 se muestran los valores promedio de tensión obtenidos en el ensayo para cada tipo de falla (falla cohesiva o falla adhesiva) y su porcentaje de ocurrencia.

Tabla 4-9. Valores de tensión obtenidos en el Ensayo de Adherencia por tracción
Fuente: elaboración propia

MATERIAL	SUSTRATO	FALLA ADHESIVA		FALLA COHESIVA	
		Promedio de tensión (kg/cm ²)	Porcentaje	Promedio de tensión (kg/cm ²)	porcentaje
S1	Hormigón	15,8	83%	17,0	17%
	Asfalto	16,8	67%	16,5	33%
S1 con microesferas incorporadas P	Hormigón	14,5	67%	14,0	33%
	Asfalto	16,2	100%	0,0	0%
A1	Hormigón	6,0	67%	5,5	33%
	Asfalto	6,5	100%	0,0	0%
A1 con microesferas incorporadas P	Hormigón	6,0	17%	5,0	83%
	Asfalto	6,0	67%	6,0	33%
A2	Hormigón	13,5	33%	14,0	67%
	Asfalto	14,7	50%	15,3	50%
A2 con microesferas incorporadas P	Hormigón	6,0	33%	13,0	67%
	Asfalto	13,0	50%	13,0	50%
A3	Hormigón	14,7	50%	14,7	50%
	Asfalto	15,8	83%	17,0	17%
A3 con microesferas incorporadas P	Hormigón	14,0	67%	14,0	33%
	Asfalto	15,4	83%	15,0	17%

De este ensayo, se desprende que la pintura A1 que, según la caracterización realizada corresponde a una pintura acrílica estirenada base acuosa, presenta valores de tensión por adhesión muy bajos en ambos tipos de falla. Por el contrario la pintura acrílica estirenada base solvente, S1, presenta los valores más elevados de tensión. Las otras pinturas presentan valores parejos y acordes a lo que se espera encontrar en el ensayo. En general se observa que en el sustrato de mezcla asfáltica los valores son más altos y podría deberse a, que en general, presentan una macrotextura gruesa que podría

facilitar la adherencia pintura-sustrato; aunque este aspecto, de acuerdo con la bibliografía consultada afecta a la durabilidad de los recubrimientos. En todos los casos se observa que el valor de tensión disminuye al incorporar microesferas de premezcla, pero los valores se mantienen en un rango que se podría considerar aceptable. En general, se presentan ambos tipos de fallas, solo en el caso de la pintura S1 con microesferas incorporadas y la A1 en ambos casos, no presentan falla cohesiva.

4.7 Resumen de resultados de los ensayos implementados

En la Tabla 4-10, con un formato de doble entrada, se presenta un resumen de los resultados de las distintas muestras de pintura en cada uno de los ensayos implementados. Para ello, se utiliza una escala de colores para indicar el material que evidencia el mejor comportamiento (color verde) y, el peor comportamiento (color rojo).

Tabla 4-10. Valores de tensión obtenidos en el Ensayo de Adherencia por tracción
Fuente: elaboración propia

Ensayo		Pintura A1	Pintura A2	Pintura A3	Pintura S1
Wheel Tracking Test	Resistencia al deslizamiento		-----	-----	
	Q _d		-----	-----	
	RL ₃₀	-----	-----	-----	
Abrasión por vía húmeda sobre marca vial		-----	-----	-----	
Taber Abraser					
Abrasión por vía húmeda sobre pintura					
Pulimento Acelerado	Abrasión				
	Desprendimiento				
Absorción					
Velocidad de absorción					
Ensuciamiento					
Ensayo de adherencia	Sin microesferas incorporadas				
	con microesferas incorporadas				

Escala de colores: 

La justificación de los colores en cada ensayo se puede apreciar en los apartados correspondientes a los mismos.

Un aspecto que resulta relevante es la diferencia en el comportamiento de los ensayos de abrasión en los materiales base. Los dos ensayos implementados para evaluar la abrasión en húmedo, es decir el de Pulimento Acelerado y el de abrasión por vía húmeda (WTAT), evidencian un mejor comportamiento de las pinturas S1 y A3; en cambio, la pintura S1 evidencia un mal comportamiento en el ensayo Taber abraser. Además, el ensayo de Pulimento Acelerado evidencia fallas de adherencia, a diferencia del Taber abraser en el cual presenta un buen comportamiento.

Otro aspecto importante que surge de observar la Tabla 4-10, es que el ensayo de absorción está relacionado con la pérdida de peso por abrasión mediante los ensayos de Pulimento Acelerado y abrasión por vía húmeda, debido a que las pinturas que presentan un mejor comportamiento en este ensayo son las que tienen menor absorción de agua. Además, están correlacionados tanto la absorción como la velocidad de absorción en las primeras 3 horas de las películas de pintura con la facilidad de que la suciedad se adhiera en la misma según la experiencia realizada.

Referencias

ALONSO FELIPE, J., "Pinturas, barnices y afines: composición, formulación y caracterización", 2016.

ASTM, "ASTM D913: Standard Practice for Evaluating Degree of Pavement Marking Line Wear, 2020.

CADDY, B., "Forensic examination of glass and paint: analysis and interpretation", CRC press, 2001.

CALAVIA D., "Demarcación horizontal – Seguridad vial – La visibilidad de las marcas viales – Aspectos fotométricos – Retrorreflexión". Revista Carreteras, Argentina, n 145, pp. 47 a 55, 1995.

CARBONELL, J., "Pinturas y recubrimientos.: introducción a su tecnología". Ediciones Díaz de Santos, 2011.

Chicago Society for Coatings Technology. Infrared Spectroscopy Committee. An infrared spectroscopy atlas for the coatings industry. Federation of Societies for Coatings Technology, 1980.

DI CRESCENZO, M., ZENDRI, E., SÁNCHEZ-PONS, M., FUSTER-LÓPEZ, L., YUSÁ-MARCO, D., "The use of waterborne paints in contemporary murals: comparing the stability of vinyl, acrylic and styrene-acrylic formulations to outdoor weathering conditions". Polymer degradation and stability, 107, 285-293, 2014.

DVN, Dirección Nacional de Vialidad, "Manual de señalamiento Horizontal de la Dirección Nacional de Vialidad", aprobado por resolución 2501/2012, 2012.

FATEMI, S., VARKANI, M. K., RANJBAR, Z., BASTANI, S., "Optimization of the water-based road-marking paint by experimental design, mixture method". Progress in organic coatings, 55(4), 337-344, 2006.

GIUDICE, C., PEREYRA, A., "Tecnología de Pinturas y Recubrimientos: Componentes, Formulación, Manufactura y Control de Calidad", Editorial edUTecNe (ISBN 978-987-25360-2-2), Facultad Regional La Plata, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina, 2009.

GLASSBEADS – (Consultado 15 de junio de 2020 en: https://www.glassbeads.com.ar/descargas/CERTIFICADO_CONTROLH85_GLASSBEADS_2010.pdf)

Marcas viales – (Consultado 15 de junio de 2020 en: <http://www.marcasviales-sa.es/upload/FTME-113ECHOSTAR20WBP.pdf>)

GREYSON, E., METLA, D., GALLAGHER, J., SCHALL, D. "Modernizing and Streamlining Waterborne Traffic Paint Specifications", Transportation Research Record, 2612(1), 104-112, 2017.

IRAM. "Norma IRAM 1109 Método B XXII "Pinturas. Métodos de ensayo generales. Método de determinación de la adhesividad por la técnica de tracción.", 1985.

IRAM. "Norma IRAM 1555: Agregados. Determinación del coeficiente de resistencia al deslizamiento con el péndulo TRRL.", 1998.

IRAM. "Norma IRAM 1225: Recubrimientos para demarcación de pavimentos. Microesferas de vidrio", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina, 2014.

UNE, "Norma UNE EN 1436: Materiales para señalización vial horizontal. Comportamiento de las marcas viales aplicadas sobre la calzada", 2009.

UNE, "Norma UNE 135203-1: Equipamiento para la señalización vial. Señalización horizontal. Materiales. Ensayos de abrasión en laboratorio. Parte 1: Determinación de la resistencia a la abrasión mediante el método Taber", 2010.

UNE, "UNE-EN 13036-1: Características superficiales de carreteras y aeropuertos. Métodos de ensayo. Parte 1: Medición de la profundidad de la macrotextura superficial del pavimento mediante el método volumétrico", 2010.

5.1 Introducción

Concluidos los ensayos de laboratorio para la evaluación en servicio de las pinturas y los sistemas de demarcación horizontal, se encuentra que existen diferencias en el comportamiento en los distintos ensayos realizados. Por ejemplo, en los ensayos de durabilidad implantados con el equipo WTT (Capítulo 4, Inciso 4.4.1) se observan variaciones en los parámetros esenciales, pero no se obtienen fallas de desprendimiento en los recubrimientos. Por otro lado, con el equipo de Pulimento Acelerado (Capítulo 4, Inciso 4.5.3) se observa un comportamiento distinto de los materiales comparados con el ensayo *Taber Abraser* (Capítulo 4, Inciso 4.5.1). Además, en el ensayo de Pulimento Acelerado se observa una mayor cantidad de fallas por desprendimiento de la pintura en el caso de los materiales acuosos. En base a la problemática planteada en estos ensayos, de poner en evidencia las fallas en servicio de las marcas viales, se demuestra la necesidad de una comparación en campo para observar el verdadero comportamiento y, de esta manera, interpretar los resultados obtenidos de los ensayos implementados en laboratorio.

Como se presenta en el Capítulo 3, en algunos países se utiliza el “ensayo de referencia” para evaluar el comportamiento de las marcas viales sin norma de aplicación. El ensayo consiste básicamente en aplicar el material en un tramo de ruta y observar su evolución en el tiempo. El mismo es muy utilizado en Argentina para evaluar el comportamiento de los distintos materiales existentes. También existe el Ensayo de Campo (Norma UNE-EN 1824/2012) que consiste en realizar las marcas viales de una forma precisa en un tramo de ruta con los productos a evaluar y así estudiar el comportamiento en el tiempo.

Del análisis de las posibilidades existentes, se concluye que la opción adecuada es la realización de una prueba de los materiales en el acceso de la UTN FRLP. A causa de que es una zona de universidad y escuelas, no es posible realizar una demarcación del tipo de campo de ensayo. Por este motivo, y ante la necesidad de reubicación de la senda peatonal existente en el acceso peatonal a la UTN FRLP, se decide realizar una nueva senda peatonal con los materiales en estudio y de esta forma poder conocer el comportamiento en servicio de estos. Además de la senda peatonal se adicionan franjas

transversales en la dársena de acceso en la UTN FRLP. En la Figura 5-1 se presenta un esquema de la zona con las sendas existentes y el planteo del trabajo.

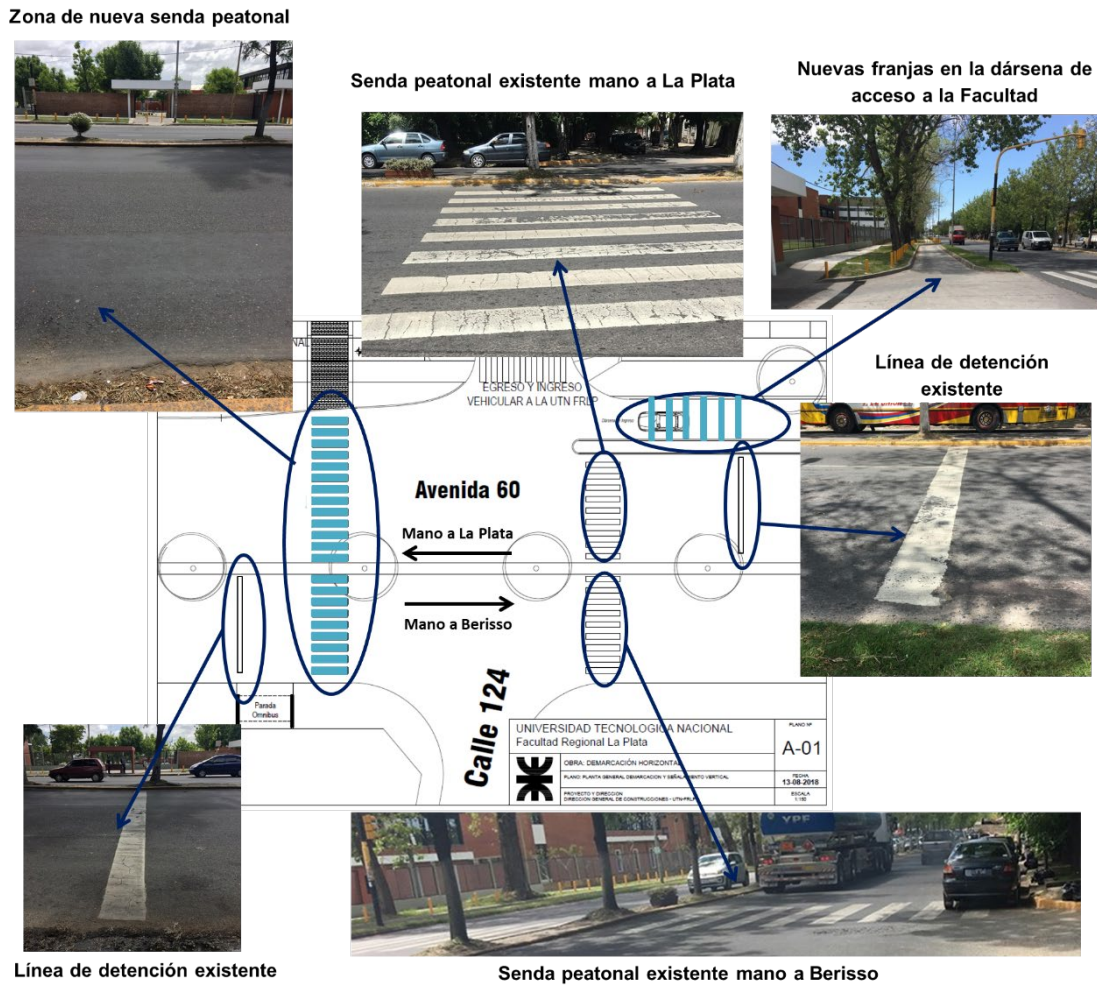
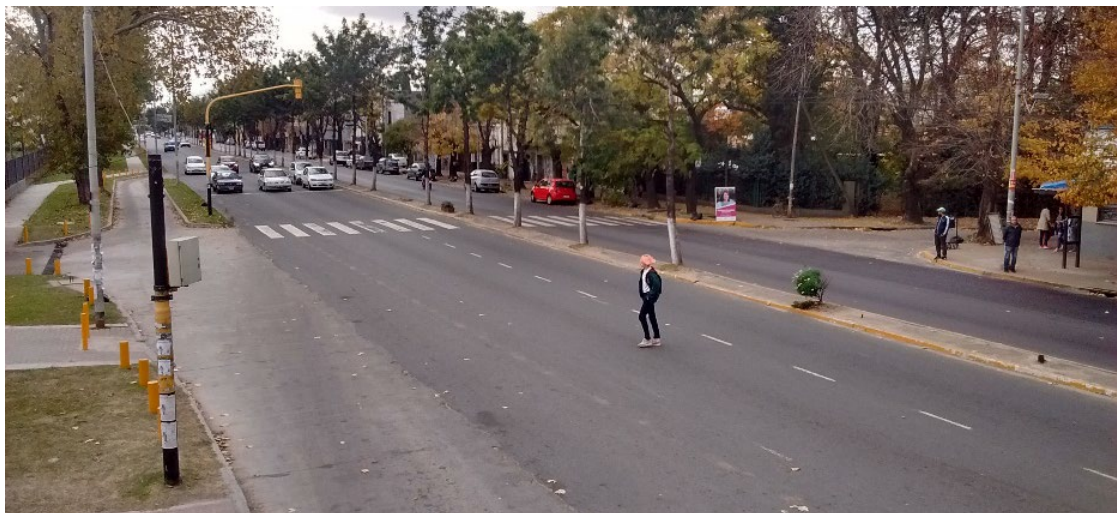


Figura 5-1. Esquema de situación existente y planteo de los trabajos
Fuente: UTN FRLP (adaptación propia)

Se coordinan los trabajos y se comienzan los trámites para obtener los permisos necesarios. Para ello, se presentan solicitudes en Vialidad de la Provincia de Buenos Aires para obtener la autorización y en la Municipalidad de Berisso para la coordinación del tránsito en la Avenida 60. El trabajo se realiza el sábado 8 de junio de 2019. En la Figura 5-2 se observa la ubicación en la que se realiza la senda peatonal y en la Figura 5-3 una imagen tomada en los días previos a la aplicación de la pintura donde se observa la necesidad de la senda peatonal.



*Figura 5-2. Sector en el cual se realiza la demarcación
Fuente: www.google.com.ar/maps (adaptación propia)*



*Figura 5-3. Imagen previa a la aplicación de la pintura
Fuente: elaboración propia*

5.2 Metodología

Se realizan dos tipos de demarcaciones: una es la nueva senda peatonal y, por otro lado, se realizan franjas horizontales en la dársena de acceso. En la Figura 5-4 se presenta el esquema general con la denominación de cada una de las franjas. En las franjas de F1 a F12 de la senda peatonal sobre la Avenida 60 en sentido a La Plata y en las franjas F21 a F23 de la dársena de acceso se aplica la pintura base solvente S1 sobre la que se siembran microesferas TAF-S2. Por el contrario, en las franjas de F13 a F20 en la Avenida 60 en sentido a Berisso y en las franjas F24 a F26 de la dársena

de acceso se aplica la pintura base acuosa A3 sobre la que se siembran microesferas ECH-20-WBP. Estos materiales son los utilizados en la tesis y son descriptos en el Capítulo 4.

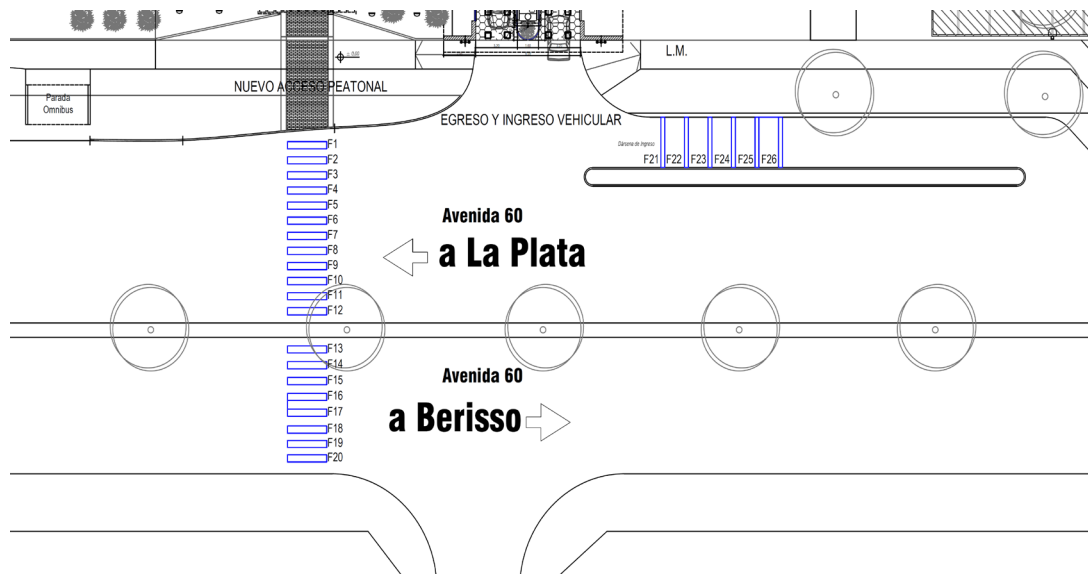


Figura 5-4. Esquema general de la demarcación

Fuente: UTN FRLP (adaptación propia)

Las franjas de la senda peatonal tienen una longitud de 5 m y un ancho de 0,50 m, separadas 0,50 m cada una. Por otro lado, las franjas de la dársena tienen un ancho de 0,30 m.

Previo a la realización de cualquier trabajo se realiza la limpieza del sector y se marcan los límites de las franjas de la senda con tiza. Luego se coloca cinta de pintor en la superficie conformándose las medidas de las franjas, Figura 5-5.



Figura 5-5. Delimitación de las franjas en la senda peatonal

Fuente: elaboración propia

Luego se mide la humedad del pavimento de Hormigón con el equipo TRAMEX – CMEXPERT II HYGRO. No se toma esta medida en el pavimento asfáltico debido a que el mismo no mide la humedad en dichos pavimentos. La aplicación de las pinturas se realiza con un equipo por pulverización con una máquina Graco Linelazer 3900, Figura 5-6, y las microesferas se siembran con un regador de microesferas manual, Figura 5-7.



Figura 5-6. Equipo utilizado para pulverizar la pintura

Fuente: <https://www.graco.com>



Figura 5-7. Regador de Microesferas

Fuente: elaboración propia

Las Figuras 5-8 a la Figura 5-10 muestran en el primer caso la aplicación de la pintura en la Avenida 60 mano a La Plata (F1 a F12); en el segundo, la aplicación en la avenida mano a Berisso (F13 a F20). Y, finalmente las últimas imágenes muestran el procedimiento de trabajo en la dársena de acceso (F21 a F26).



Figura 5-8. Aplicación de la Pintura S1 sobre la senda peatonal mano a La Plata

Fuente: elaboración propia



Figura 5-9. Aplicación de la Pintura A3 sobre la senda peatonal mano a Berisso

Fuente: elaboración propia



Figura 5-10. Pintura de Franjas sobre dársena de ingreso a la UTN FRLP

Fuente: elaboración propia

Para lograr la mínima interrupción del tránsito se pinta en una primera instancia el tramo de la Avenida 60 mano de Berisso a La Plata y cuatro franjas de la senda de la avenida mano de La Plata a Berisso. Para esperar el tiempo de secado de la pintura, se procede a realizar las franjas en la dársena de acceso a la Facultad y se pintan unas probetas para luego ensayar con el equipo de Pulimento Acelerado, Figura 5-11. Luego, se pintan las franjas restantes en la Avenida 60 mano a Berisso.



Figura 5-11. Preparación de probetas de Pulimento Acelerado

Fuente: elaboración propia

En el caso de las probetas, se dejan secar a temperatura ambiente y se colocan en la estufa a 40°C. Posteriormente se realiza el procedimiento de ensayo detallado en el Capítulo 4, inciso 4.5.3.

Una vez que las marcas se secan, se procede a medir los datos de retrorreflexión y luminancia con el retrorreflectómetro tipo EASYLUX, Figura 5-12. Como se menciona en los capítulos anteriores, este equipo brinda resultados de retrorreflexión con geometría a 15 m y 30 m (*RL15* y *RL30*) y luminancia (*Qd*). Además, el lunes 10 de junio se miden los valores de resistencia al deslizamiento con el péndulo inglés en la dársena de acceso, Figura 5-13.



Figura 5-12. Medición de los parámetros de visibilidad con el retrorreflectómetro

Fuente: elaboración propia



Figura 5-13. Medición de los parámetros de resistencia al deslizamiento en la dársena

Fuente: elaboración propia

Además, se obtienen los datos de las condiciones ambientales, tanto del día de aplicación como de los períodos posteriores, con la estación meteorológica EMA que se encuentra dentro del predio de la UTN FRLP. De los datos posteriores a la aplicación interesan conocer los datos de precipitación y temperatura. Por último, se toman fotografías de las franjas con la finalidad de comparar la variación del aspecto en el tiempo.

5.3 Resultados y discusión

La Figura 5-14 muestra las franjas en la Avenida 60 mano de Berisso a La Plata con la pintura S1. En las franjas F1 y F2 se mide la humedad con el equipo mencionado anteriormente, que brinda información sobre la humedad superficial en el hormigón. Con el mismo se obtienen valores de 2,6 % a 2,8 %. El mismo valor se obtiene en la medición en la zona de la dársena de acceso. Como se menciona en los párrafos anteriores debido a que el equipo brinda valores sólo en hormigón, no se realiza esta medición en el pavimento asfáltico.



Figura 5-14. Denominación de las Franjas en la Avenida 60 mano a La Plata

Fuente: elaboración propia

En este sector, se comienza a pintar a las 9 horas y la pintura no seca en el tiempo estimado. A las 2 horas 20 minutos se debe habilitar el tránsito en las franjas F11 y F12 para descomprimir los inconvenientes generados por el corte de la Avenida. En la Figura 5-15 se presenta la fotografía tomada en el momento que circula el primer vehículo. Allí se puede ver que la senda peatonal está intacta. Luego del paso de los vehículos, la pintura salpica y marca el pavimento como se puede apreciar en las Figura 5-16 y Figura 5-17. El resto de las franjas de esta mano se mantienen cerradas al tránsito hasta las 14:40 horas. Es decir, que se habilitan a las 5 horas de aplicada la pintura y aún, luego de transcurrido ese tiempo no estaban secas.



Figura 5-15. Senda peatonal momentos previos a la habilitación de las franjas

Fuente: elaboración propia



Figura 5-16. Marca en el pavimento luego de la habilitación de las franjas
Fuente: elaboración propia



Figura 5-17. Marcas en la pintura por el paso de los vehículos
Fuente: elaboración propia

En la zona donde se aplica esta pintura sobre hormigón se observan ampollas, como se puede ver en la Figura 5-18, con una gran densidad de aparición y en diversos tamaños. No ocurre lo mismo en la parte de sustrato con mezcla asfáltica, cuya superficie se puede observar en la misma figura.



Figura 5-18. Izq.: Pintura S1 en pavimento de Hormigón; Der.: Pintura S1 en pavimento asfáltico

Fuente: elaboración propia

La Figura 5-19 muestra las franjas en la Avenida 60 sentido de La Plata a Berisso en la cual se aplica la pintura A3.

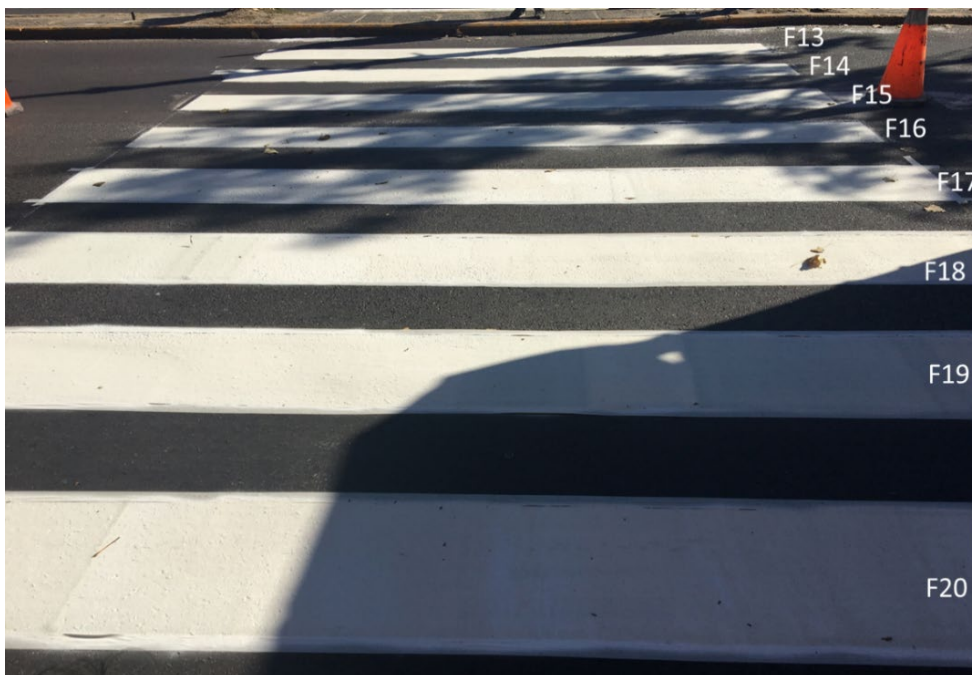


Figura 5-19. Denominación de las Franjas en la Avenida 60 mano a Berisso

Fuente: elaboración propia

Las franjas F13 a F16 son pintadas en una primera etapa que se habilita a las 2 horas 20 min. Las franjas F17 a F20 se pintan a las 12.30 y a las 2 horas ya es posible habilitarlas. En este tramo no es posible medir la humedad superficial debido a que es un pavimento asfáltico.

En el proceso de secado de la película de pintura se observa la formación de una capa superficial seca, pero con el material interior aún húmedo, Figura 5-20.



Figura 5-20. Secado de capa superficial de la Pintura A3

Fuente: elaboración propia

Además, se observa que al pasar una bicicleta (aún con la película húmeda) se marca la huella de la rueda, pero a diferencia de la pintura S1, no marca el pavimento como se puede observar en la Figura 5-21.



Figura 5-21. Huella sobre película húmeda de pintura A3

Fuente: elaboración propia.

La dársena de acceso a la UTN FRLP permite comparar en un aspecto más amplio ambas pinturas (S1 y A3) debido a que son aplicadas sobre el mismo sustrato y con iguales condiciones de tránsito. Por ejemplo, en referencia al aspecto visual, se destaca que la pintura base solvente (S1) presenta una densidad de aparición de ampollas considerable como se menciona en la Figura 5-18. En cambio, en el caso de la pintura base acuosa A3 no se observa este tipo de falla. La diferencia entre ambas franjas se presenta en la Figura 5-22.



Figura 5-22. Pinturas en la dársena de ingreso. Izq.: Pintura S1. Der.: Pintura A3

Fuente: elaboración propia

En la Figura 5-23 a Figura 5-25 se presentan los valores de la resistencia al deslizamiento obtenidos con el péndulo inglés en las franjas de la dársena de acceso, los valores de retrorreflexión con geometría de 30 metros y luminancia en condiciones de iluminación difusa obtenidas con el retroreflectómetro en todas las franjas realizadas.

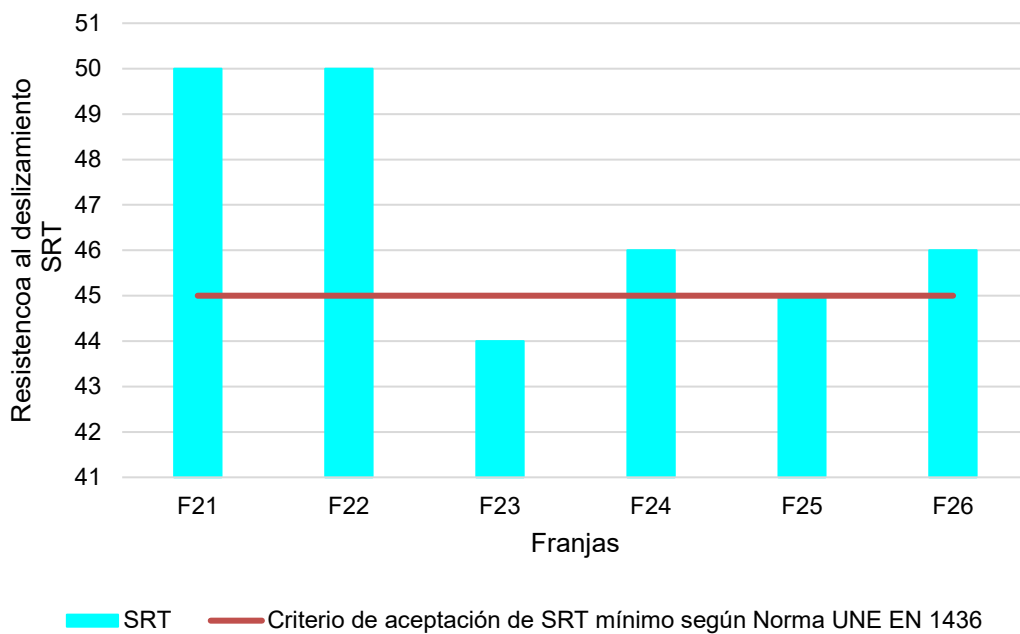


Figura 5-23. Resistencia al deslizamiento de las franjas en la dársena de acceso

Fuente: elaboración propia

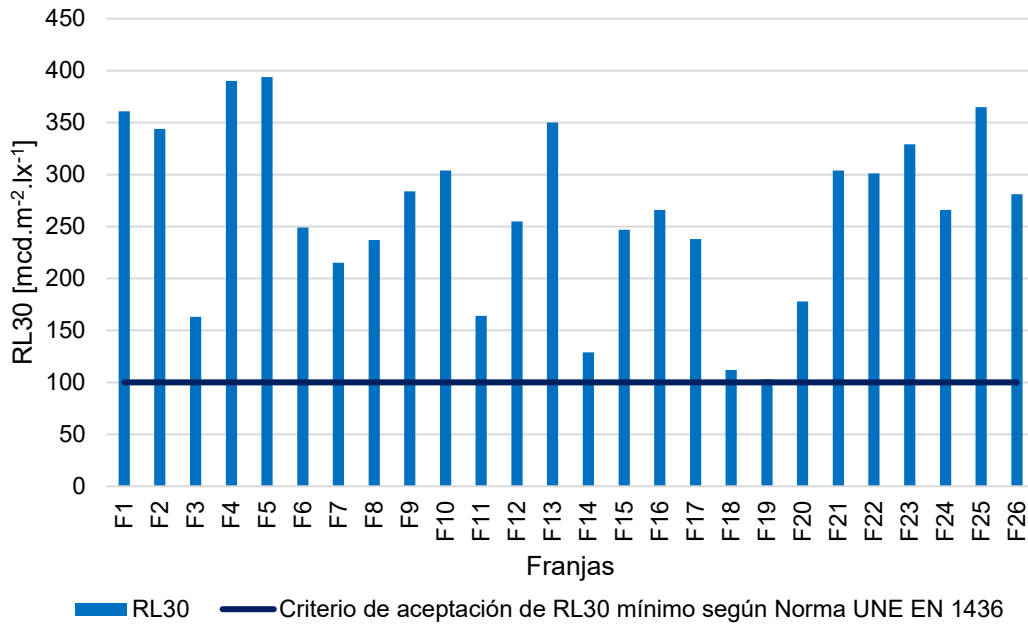


Figura 5-24. Retroreflexión con geometría a 30 metros de todas las franjas

Fuente: elaboración propia

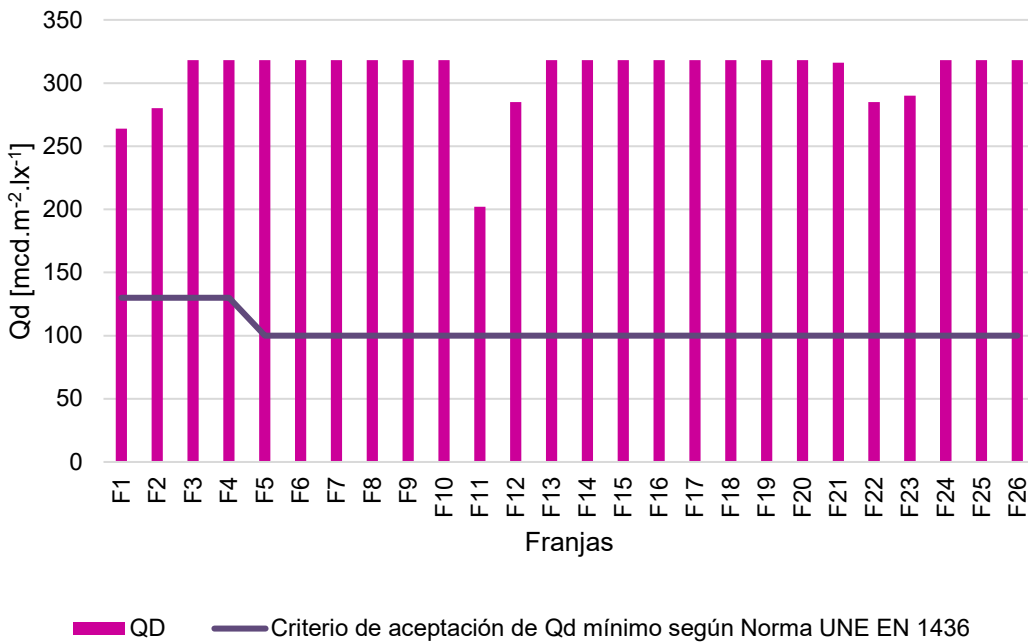


Figura 5-25. Luminancia en iluminación difusa de todas las franjas

Fuente: elaboración propia

Se destaca la uniformidad en los valores de Qd en todas las franjas realizadas. Asimismo, se observa que los valores son ampliamente superiores al mínimo establecido en la Norma UNE-EN 1436/2009. Es importante mencionar el caso de las Franjas F11 y F12, con valores de $200 \text{ mcd.lx}^{-1}.\text{m}^{-2}$ y $285 \text{ mcd.lx}^{-1}.\text{m}^{-2}$, en las cuales la

disminución del valor comparada con el resto puede deberse a la habilitación prematura de las mismas (Figura 5-16 y Figura 5-17). No sucede lo mismo con los valores de *RL30* de todas las franjas realizadas, Figura 5-24, en las cuales se observa que existe un amplio rango de valores. Podemos decir que, tanto en la Avenida como en la dársena de acceso, la pintura S1 tuvo valores superiores a la pintura A3. Por ejemplo, si se considera el promedio de valores en la Avenida 60, la pintura S1 tiene un valor de *RL30* de 280 $\text{mcd.lx}^{-1}.\text{m}^{-2}$ y la pintura A3 un valor de 203 $\text{mcd.lx}^{-1}.\text{m}^{-2}$. De la misma forma ocurre en la senda peatonal, en la cual, la pintura S1 tiene un valor de *RL30* de 311 $\text{mcd.lx}^{-1}.\text{m}^{-2}$ y la pintura A3 un valor de 304 $\text{mcd.lx}^{-1}.\text{m}^{-2}$.

De la Figura 5-23, en la que se representa la resistencia al deslizamiento, se observa que la pintura base solvente presenta una gran dispersión en los valores debido a que dos valores cumplen ampliamente con los valores mínimos pero la franja F23 presenta un valor de 44 SRT. En cambio, la pintura A3 presenta valores homogéneos que cumplen con el mínimo establecido en la norma española. Es importante mencionar que este requisito no es exigido en la Argentina, por este motivo y con la finalidad de considerar valores de referencia nos remitimos a la Norma UNE-EN 1436/2009.

Se recopilan los valores de las condiciones ambientales obtenidos de la estación meteorológica EMA de la UTN FRLP considerando el día y los horarios en que se realizó el trabajo.

Tabla 5-1. Condiciones ambientales en el momento de aplicación de las pinturas
Fuente: estación Meteorológica EMA UTN FRLP (adaptación propia)

ZONA PINTADA	HORA	TEMP. EXT.	HUM. EXT.	PTO. ROCÍO	VEL. VIENTO	DIR. VIENTO	SENS. TERM.
Pintura S1 sobre Av. 60	9 - 9:30	10,8 a 12,3	58 a 54 %	2,8 a 3,2	6,4 a 8	O	10,3 a 11,7
Pintura A3 sobre Av. 60 - Primer etapa	10	13,6	52	3,9	6,4	NO	13,5
Pintura sobre dársena	10:15	14	51	4	8	NO	13,7
Pintura A3 sobre Av. 60 - Segunda etapa	12:30	17,6	40	3,8	9,7	O	17,6

Además, se procesan otros datos de la estación meteorológica EMA para conocer las condiciones ambientales durante las primeras semanas debido a que las semanas

posteriores presentaron una alta preponderancia de lluvia. En la Figura 5-26 se presenta la variación de la humedad (%) y la Temperatura (°C) en el período del 8 de junio al 25 de junio del 2019 y, en la Figura 5-27 se presenta el valor de precipitación diaria durante el mismo período.

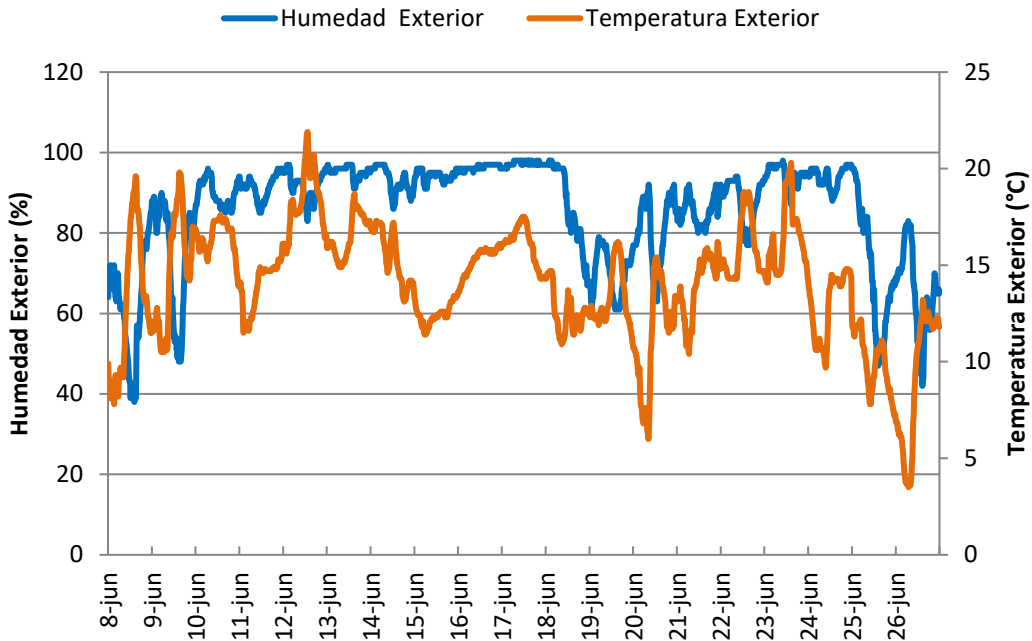


Figura 5-26. Valores de humedad y temperatura durante el primer período
Fuente: estación Meteorológica EMA UTN FRLP (adaptación propia)

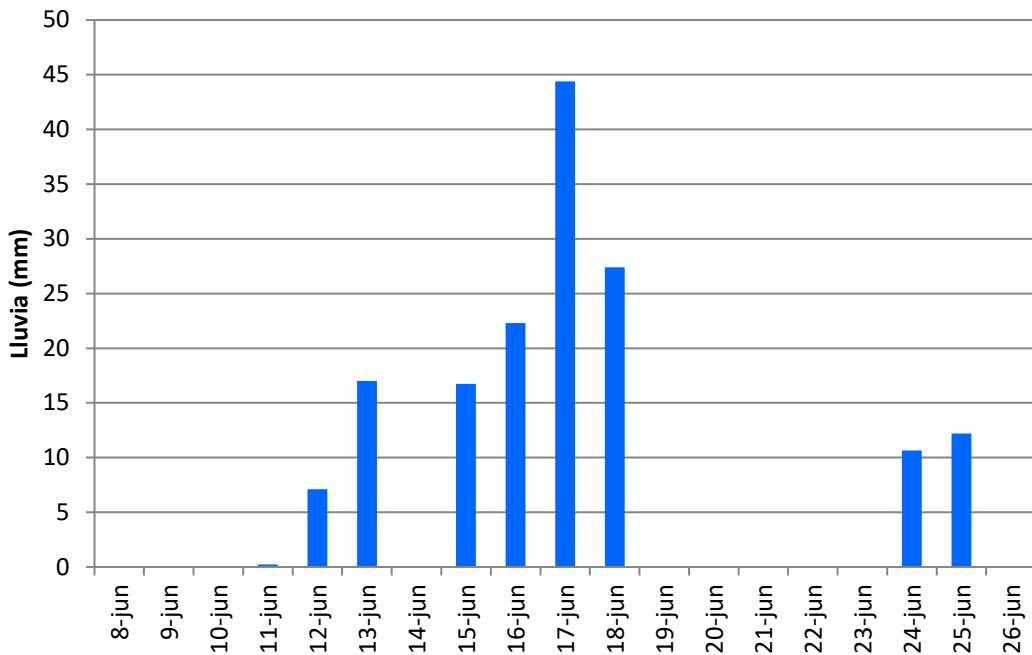


Figura 5-27. Precipitación durante el primer período luego de la aplicación de la pintura
Fuente: estación Meteorológica EMA UTN FRLP (adaptación propia)

Considerando este plazo de tiempo de 17 días y, en base a los datos suministrados por la garita de ingreso a la UTN FRLP, se estima que han pasado aproximadamente 5500 vehículos sobre las franjas en la dársena de acceso.

Por otro lado, de acuerdo con una aproximación realizada en la Avenida 60 con el conteo del tránsito el martes 11 de junio de 2019 de 8 a 9 horas y utilizando un coeficiente de 13,2 (Rivera, 2007) para obtener el TMDA (tránsito medio diario anual) se estima en la Avenida 60 un TMDA de 30230 autos.

En la Figura 5-28 se presenta la comparación de imagen de la senda peatonal en la Avenida 60 mano de Berisso a La Plata donde se aplica la base solvente S1. Luego en la Figura 5-29 se presenta la comparación de imágenes en la senda peatonal en la Avenida 60 en el sentido de La Plata a Berisso. Se puede observar que el deterioro se evidencia de manera notable del viernes 14 al miércoles 19 de junio de 2019. Éste fenómeno, se relaciona con las condiciones climáticas críticas mencionadas de temperatura, humedad y precipitación. Por ejemplo, luego de aplicada la pintura, la temperatura se mantiene en valores bajos (entre 10 °C y 20 °C) con elevada humedad ambiente (en general por encima del 80 %, salvo algunos picos inferiores de 40 %) continuados por una semana de lluvia.

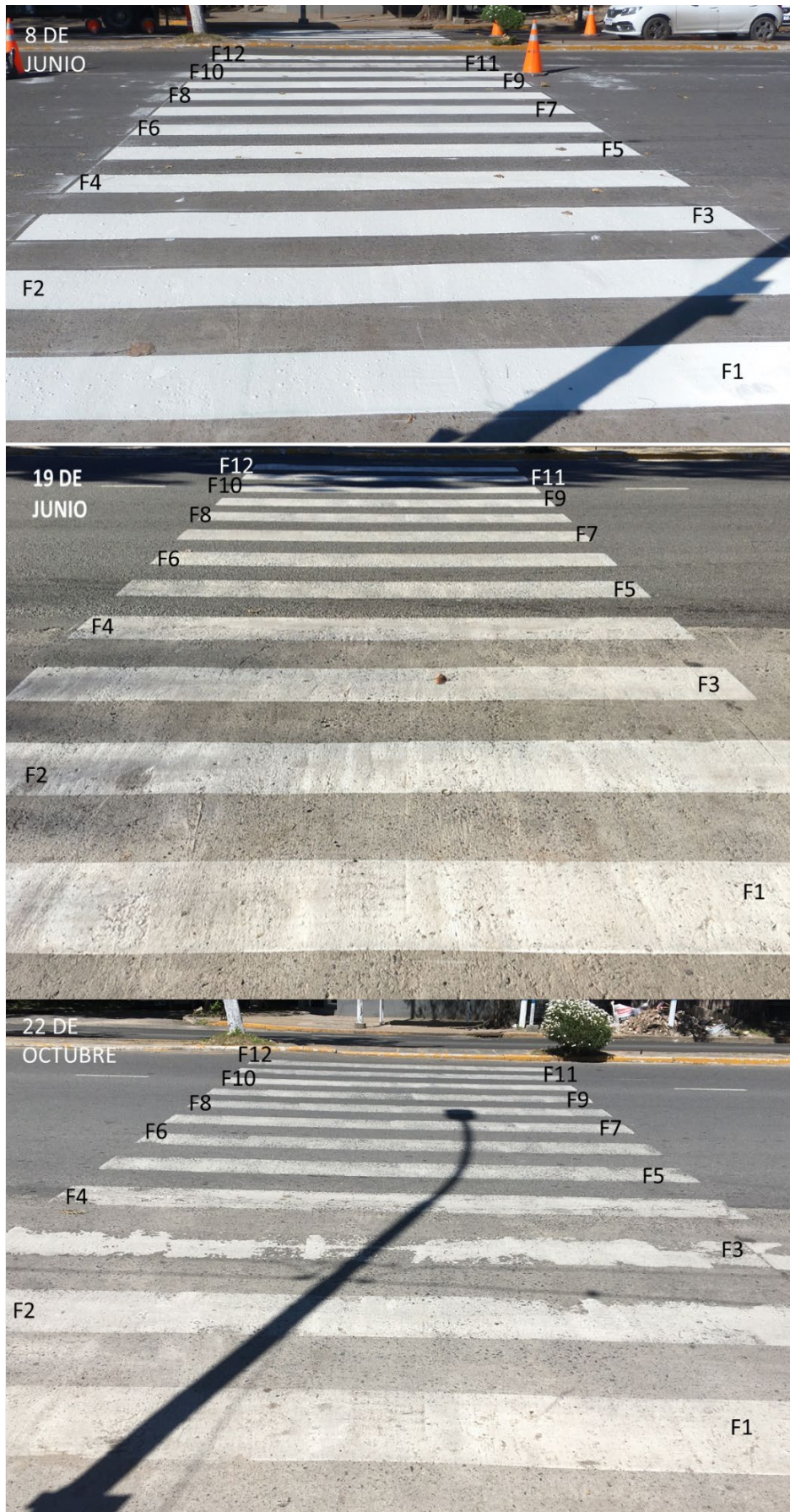


Figura 5-28. Secuencia de fotos en la senda peatonal con pintura S1

Fuente: elaboración propia



Figura 5-29. Secuencia de fotos en la senda peatonal con pintura A3

Fuente: elaboración propia

Por último, en las Figura 5-30 se muestra la secuencia de la Franja F23 con pintura base solvente (S1) y en la Figura 5-31 de la Franja F26 con Pintura Acuosa (A3).



Figura 5-30. Secuencia fotográfica de la franja F23 con pintura S1
Fuente: elaboración propia.



Figura 5-31. Secuencia fotográfica de la franja F26 con pintura A3
Fuente: elaboración propia

De esta secuencia fotográfica, se resalta el deterioro sufrido en las pinturas base acuosa A3 a pocos días de colocada que, evidentemente por su aspecto visual se debe al desprendimiento de la película de pintura. Es prudente resaltar que, en este caso de la dársena de acceso, se observa que la película se desprende principalmente del lado donde se acumula agua. Por otro lado, la pintura S1 transcurrido los 4 meses de aplicada, presenta un desgaste principalmente en la zona donde el pavimento es de

hormigón (Franjas F3 y F4) pero, a pesar de ello, se puede decir que demuestra un buen comportamiento en servicio.

Por último, se presentan los resultados del ensayo de pulimento en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2. Resultados del ensayo de Pulimento Acelerado
Fuente: elaboración propia

MUESTRA	TIPO DE PINTURA	Peso inicial P ₁ (g)	Peso final P ₂ (g)	Pérdida de peso (g)	Pérdida de peso (mg)	Pérdida de peso promedio (g)	desvío estándar (g)	Coefficiente de variación (%)
M1	A3	90,8318	90,7559	0,0759	75,90	94,660	11,792	12,457
M2		82,577	82,47	0,1070	107,00			
M3		93,0007	92,9053	0,0954	95,40			
M4 (*)		92,6099	92,3863	0,2236	223,60			
M5 (*)		85,6614	85,3571	0,3043	304,30			
M6 (*)		84,2751	84,0721	0,2030	203,00			
M7		89,6982	89,5965	0,1017	101,70			
M8		90,7845	90,6912	0,0933	93,30			
M9	S1	95,1249	95,0404	0,0845	84,50	100,587	17,998	17,893
M10		88,7436	88,6384	0,1052	105,20			
M11		88,2525	88,143	0,1095	109,50			
M12		96,5135	96,4029	0,1106	110,60			
M13		91,761	91,6306	0,1304	130,40			
M14		96,045	95,9742	0,0708	70,80			
M15		95,0698	94,9743	0,0955	95,50			
M16		96,0052	95,907	0,0982	98,20			

(*) se desprendió pintura

Podemos ver que, si bien la pintura acuosa A3 tuvo una menor pérdida de peso promedio en el ensayo, la misma presenta desprendimiento en un 37,5 % de los casos. En cambio, en el caso de la pintura base solvente presenta un valor mayor de pérdida promedio de peso, pero la misma no presenta el inconveniente de desprendimiento de pintura en este ensayo.

Referencias

Norma UNE-EN 1824/2012 "Materiales para señalización vial horizontal. Pruebas de campo".

RIVERA, J., "Metodología para la obtención del Tránsito Medio Diario Anual (TMDA) por conteos diarios", SABER Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente, vol. 19, no 2, p. 192-204, Venezuela, 2007.

6 - Conclusiones generales y recomendaciones

6.1 Aspectos generales

A lo largo de la investigación se ha realizado una amplia experimentación en laboratorio para la caracterización de los materiales utilizados en recubrimientos retrorreflectantes. Además, con los ensayos implementados se da respuesta a la necesidad, tanto de las empresas que aplican los materiales de señalización como de los fabricantes, de establecer una valoración del desempeño de los materiales considerando las acciones a las que están sometidos en servicio. Los ensayos implementados que incorporan el efecto del agua sobre la película de pintura evidencian comportamientos similares a los ocurridos en la prueba de campo. Los estudios realizados de los ensayos resultaron significativos ya que brindaron abundante información sobre los mismos y los procedimientos que se deben seguir. Este es un aspecto muy importante debido a que en la actualidad no existen ensayos que consideren la aplicación en servicio de estos materiales en Argentina y, ante la necesidad, se prueban materiales en tramos de rutas con previa autorización.

Durante el desarrollo de la investigación se establece un vínculo continuo de interacción con el sector productivo mediante convenios y transferencia tecnológica del análisis de la prueba realizada en la Avenida 60 y la implementación de los ensayos estudiados.

6.2 Discusión de aspectos relevantes

De forma preliminar, se citan una serie de aspectos relevantes que permiten relacionar el comportamiento de los materiales en los ensayos implementados con las características de estos. Además, es importante para lograr establecer comparaciones o relaciones entre los ensayos que fueran abordados en la presente tesis.

- **Estudio del desempeño**

Podemos decir que, en general, los autores relacionan la vida útil de un material de señalización vial con la duración en que se mantiene un cierto nivel de retrorreflexión que, como se muestra a lo largo de la tesis, aún no es posible establecer un consenso universal respecto al valor límite que se debe considerar y depende de una gran diversidad de factores. Teniendo en cuenta el abanico disponible de materiales y

combinaciones con microesferas es un aspecto delicado debido a que los ensayos disponibles o demandan mucho tiempo para obtener un resultado o son excesivamente costosos debido a la infraestructura necesaria. Además, se ha encontrado que algunos autores indican que las pruebas de laboratorio convencionales, como el método de caída de un abrasivo, el ensayo *Taber Abraser* y el *WeatherOmeter*, no producen los mejores resultados.

Para complementar lo mencionado, se realiza una reseña de los tipos de especificaciones utilizados en los distintos Departamentos de Transporte de EEUU. Es importante mencionar que éstos, realizan gran cantidad de estudios con las plataformas de prueba y exponen sus resultados. Como conclusión general, se resalta la importancia de algunos ensayos, como por ejemplo caracterizar el tipo de resina mediante FTIR y de establecer un valor de desempeño para no encarecer las obras por incertidumbre de la contratista. Por otro lado, si se establece directamente la composición del material podrían quedar fuera nuevos materiales con mejor desempeño.

Teniendo en cuenta las diferencias entre los distintos organismos que estudian la predicción de la vida útil en el ámbito de la retroreflexión y, que las pruebas convencionales no dan los mejores resultados en los materiales base, se concluye que no existe un consenso entre los distintos autores en la determinación del equipo más representativo o conveniente. Los ensayos implementados en la tesis brindaron información del comportamiento de la película de recubrimiento frente a la acción del tránsito y el agua que pudo relacionarse con estudios de otros autores y con la prueba de campo realizada. De esta forma, se considera que los ensayos implementados en la tesis dan respuesta a la necesidad de establecer una valoración del comportamiento en servicio con la principal ventaja de que los equipos en los cuales se implementan las metodologías de ensayo son equipos generalmente disponibles en laboratorios viales o fácilmente accesibles.

▪ **Ensayos implementados para el análisis de la durabilidad**

En las primeras experiencias realizadas con el equipo WTT, equipo ampliamente utilizado, se observa que el ensayo brinda información sobre la variación de la resistencia al deslizamiento y el comportamiento de la pintura en cuanto a la luminancia. Se desprende que en este tipo de pinturas acrílicas base acuosa, se tiene una disminución importante de los parámetros iniciales. La disminución mencionada de la

luminancia de la pintura base acuosa A1 podría insinuar la tendencia a ensuciarse de la pintura.

Relacionado a este ensayo, si bien en la tesis se encuentra clasificado en el área de abrasión, se encuentra el ensayo WTAT aplicado en marcas viales para evaluar el deterioro de las propiedades esenciales. Con este ensayo se han obtenido resultados de forma rápida, con la salvedad del traslado de la muestra para la evaluación con el retrorreflectómetro, pero no se ha podido correlacionar con un número de pasadas de ruedas. Sin embargo, permite conocer el comportamiento y la afinidad de las microesferas con la pintura. Por lo tanto, éste podría considerarse como un ensayo complementario con esta finalidad mencionada y con la principal ventaja que, si se adaptan las medidas de las probetas y dimensiones de la zona pintada podrían adaptarse las chapas de control en obra y utilizarse en este ensayo.

En ambos ensayos resulta interesante la evaluación visual con la lupa donde existen grandes diferencias. En el caso del ensayo WTT por efecto del calor, las microesferas se hunden en la masa generándose una superficie más lisa, en cambio en el ensayo WTAT las microesferas se desprenden generando una superficie más rugosa. Estos ensayos representan los efectos a los que se encuentra sometida en el pavimento una pintura de demarcación vial, considerando los mismos como necesarios para evaluar la performance de las pinturas de demarcación horizontal.

Los ensayos implementados incentivaron el desarrollo de cabinas para la evaluación del aspecto visual y adaptadas a las necesidades viales como respuesta a la necesidad de comparar las muestras. Las cabinas adaptadas a las necesidades viales se utilizaron para la comparación de muestras con diferentes dosificaciones de microesferas que podría relacionarse con los ensayos realizados para evaluar la durabilidad.

▪ **Ensayos para el estudio de la abrasión de los materiales de demarcación horizontal**

Al comparar los ensayos *Taber Abraser* y de Pulimento Acelerado se observan diferencias en el comportamiento de las pinturas S1 (base solvente) y A2 (base acuosa). En cambio, la pintura A1 fue la que tuvo mayor pérdida de peso en ambos casos y, la pintura A3 la menor pérdida de peso en las mismas condiciones de curado. Respecto a esto, es importante mencionar que el ensayo de pulimento acelerado pone en evidencia fallas de adherencia de esta pintura.

Con respecto a los otros materiales, la pintura S1 presenta una elevada pérdida de peso en el caso del ensayo *Taber Abraser*, pero no es el caso del ensayo de Pulimento Acelerado donde, comparada con los otros materiales, es una de las que presenta menor pérdida de peso y no evidencia falla por pérdida de adherencia. Este aspecto es relacionado con el comportamiento en la prueba de campo en el acceso de la Facultad. Con el ensayo de Pulimento Acelerado se recorrió un amplio camino en el desarrollo de la metodología y en la determinación del material de sustrato, condiciones de curado y parámetros evaluados. De esta manera, resulta necesario continuar con este ensayo de Pulimento Acelerado y ampliar el estudio a los otros materiales, es decir con los termoplásticos, plásticos en frío y otras pinturas. Se encuentra que es un ensayo que permite evidenciar el efecto del tránsito y el agua en las películas de pintura de demarcación vial con la gran ventaja de que permite evaluar 14 muestras en las mismas condiciones.

En cambio, en el caso del ensayo WTAT, se tiene una mayor dispersión en los resultados pudiendo solamente dejar en evidencia el efecto de lavado en las pinturas base acuosa utilizadas.

▪ **Ensayos complementarios de los materiales de demarcación horizontal**

El ensayo de absorción de agua es completamente correlacionable con las imágenes obtenidas con la lupa, por tal motivo se concluye que, a mayor uniformidad y menor rugosidad de la superficie, menor es la absorción de agua de las películas.

La absorción de agua está relacionada con la pérdida de peso por abrasión mediante el ensayo de pulimento acelerado, ya que las pinturas que presentan un mejor comportamiento en este ensayo son las que tienen menor absorción de agua (por debajo de 3 %).

Se destaca que, en los casos estudiados, tanto la absorción como la velocidad de absorción inicial de las películas de pinturas, están relacionadas con la facilidad de que la suciedad se adhiere en la misma. Es importante, poder extender este estudio a los demás materiales y, de esta forma, con un ensayo simple de pocas horas es posible detectar la facilidad de adherencia de la suciedad en las pinturas en una forma cuantificable.

▪ **Prueba de Campo en la Avenida 60**

La pintura base acuosa A3 ha tenido un mal comportamiento y se desprende la película de pintura en muy poco tiempo. Relacionable a esto, se hace referencia al ensayo de Pulimento Acelerado implementado en pinturas y detallado en los capítulos 3 y 4.

En este ensayo, se obtienen mejores resultados de pérdida de peso por abrasión en las pinturas base acuosa con respecto a la pintura base solvente, pero se hace una mención sobre los inconvenientes de adherencia hallados a baja temperatura. Por este motivo, se estima que las condiciones de curado son las que han generado este fenómeno.

Se plantea como una línea de investigación a futuro, la evaluación de la adherencia con los sustratos en estudio, en diferentes condiciones de curado, temperatura y humedad, una vez aplicado el material.

Por otro lado, se destaca que la pintura base solvente tiene un tiempo de secado muy por encima del indicado en sus características técnicas y es superior en el caso del pavimento de hormigón en comparación con el pavimento de concreto asfáltico.

6.3 Conclusiones generales

6.3.1 Respecto al objetivo general

Mediante esta tesis se han logrado implementar tres ensayos viales para simular el desgaste producido en servicio de las pinturas acrílicas de demarcación vial.

De ellos podemos mencionar que el ensayo de rueda cargada WTT y el ensayo WTAT aplicados sobre marcas viales permiten evidenciar distintos aspectos. Por ejemplo, el primero permite evaluar el comportamiento en climas cálidos y es posible obtener un número de pasos de rueda. En cambio, el segundo ensayo evidencia la afinidad de las microesferas con las pinturas.

De los métodos implementados, donde se desea considerar el efecto del agua y el tránsito en la película de pintura, se observa que el ensayo de Pulimento Acelerado brinda resultados más homogéneos y coherentes con el comportamiento que se espera en base a los materiales empleados. Se encuentra en este ensayo una herramienta eficaz en la valoración de los materiales base de demarcación vial, tanto por la rapidez

del ensayo/adquisición de los resultados como por la posibilidad de ensayar varias pinturas simultáneamente bajo las mismas condiciones.

6.3.2 Respetto a los objetivos específicos

En cuanto a desarrollar e implementar equipamiento y metodologías de ensayos viales que permitan evaluar el comportamiento de los sistemas de señalamiento vial en servicio.

Los ensayos implementados para evaluar el comportamiento de la marca vial son los realizados con el equipo de rueda cargada WTT y el de abrasión por vía húmeda WTAT. Estos ensayos tienen la ventaja que por sus dimensiones permiten evaluar la retrorreflexión y resistencia al deslizamiento, pero han demostrado distintos comportamientos en la evaluación de este último parámetro debido a las diferentes condiciones de ensayo. Respecto a esto, en el ensayo WTT las microesferas se hunden en la masa de la pintura debido a la temperatura alcanzada en el ensayo generándose una superficie más lisa. Como se mencionó, en el ensayo WTAT las microesferas se desprenden por efecto de la abrasión generando un aumento de la rugosidad en la microtextura.

Es importante destacar que con el ensayo de WTAT se obtienen resultados de forma rápida que permiten evaluar la evolución de la retrorreflexión y la resistencia al deslizamiento en el tiempo. Éste podría considerarse como un ensayo complementario con la finalidad de evaluar la afinidad de las microesferas con la pintura. Por otro lado, el ensayo de WTT podría ser una herramienta para considerar el efecto en simultaneo de la temperatura y el paso de la rueda.

En cuanto a establecer e implementar metodología de ensayos simples para evaluar características de las pinturas en servicio.

Además de los ensayos principales para evaluar el comportamiento se implementa el ensayo de absorción de agua en las películas de pintura y se evalúa la velocidad de absorción en las primeras tres horas.

Se demuestra que, en los materiales estudiados, existe una relación entre Absorción de agua de la pintura con el comportamiento en los ensayos de abrasión mediante Pulimento Acelerado. Además, se logra establecer una relación entre la Velocidad de

absorción con la facilidad de ensuciamiento de las pinturas. Encontrándose que la que presenta mayor velocidad de absorción en las primeras 3 horas es, precisamente, la muestra que más se ensucia en las pruebas. Además, en coincidencia con esto es la que presenta mayor valor de absorción en agua.

En cuanto a comparar el comportamiento experimental en laboratorio con la experiencia obtenida con una prueba de campo sobre un camino existente.

Se establece una relación del comportamiento de la pintura A3 en la Avenida de acceso a la Facultad con el ensayo de Pulimento Acelerado debido la presencia de fallas de adherencia en las probetas realizadas.

La pintura de base solvente S1 presenta comportamiento aceptable, a pesar de las condiciones ambientales adversas que ha atravesado. Es relacionable con el ensayo de rueda cargada o WTT, en el cual, luego de repetir el ensayo 10 veces no se han observado fallas y, con el ensayo de Pulimento Acelerado en el que ha presentado un buen comportamiento comparado con las pinturas A1 y A3.

6.4 Líneas de investigación a futuro

Dado los diversos aspectos abordados y los resultados a los que se arribó a lo largo del desarrollo de la tesis, surgen una serie de recomendaciones a considerar en futuras investigaciones que traten la temática. Se enumeran aquellas que se consideran de mayor relevancia:

- Esta tesis contribuye en la aplicación de tres metodologías para el ensayo de recubrimientos retrorreflectantes en equipos de uso vial. En esta oportunidad, los ensayos fueron realizados en pinturas acrílicas base acuosa y base solvente. Debido a la cantidad de materiales disponibles y posibilidad de combinaciones con las microesferas, se recomienda ampliar el estudio de los ensayos implementados en los materiales termoplásticos, en plásticos en frío y en los restantes tipos de pintura con las siguientes consideraciones:
 - Se recomienda priorizar el uso del ensayo de Pulimento Acelerado para los materiales base utilizados en los recubrimientos retrorreflectantes debido a que se encontró que, en los materiales estudiados, nos da información del comportamiento de los mismos en condiciones en

servicio. Asimismo, tiene la ventaja que las muestras son maniobrables y permite evaluar 14 muestras en un ensayo.

- El ensayo de abrasión por vía húmeda aplicado a marcas viales demostró correlación con estudios de degradación de la retrorreflexión. Se recomienda que se incorpore este ensayo en el resto de los materiales retrorreflectantes teniendo en cuenta, en los casos que sea posible y en las primeras experiencias, evitar el agregado de microesferas incorporadas en los materiales con la finalidad de que no interfieran en la evolución de la retrorreflexión de las microesferas que se siembren.
- En el ensayo Wheel Tracking Test se recomienda que, en los estudios posteriores, en cada nuevo material que se ensaye, se continúen los ciclos hasta observar el desgaste del material de acuerdo a los patrones de la Norma ASTM D913 u otra norma de referencia. En las primeras pruebas y, en el caso de evaluar la retrorreflexión de las muestras, se debe evitar el agregado de las microesferas incorporadas en la pintura con la finalidad de evaluar sólo las microesferas sembradas y reducir variables que afecten los valores.
- Relacionado a los ensayos complementarios, se encontró en el ensayo de absorción una herramienta importante en las pinturas acrílicas para contar con información relativa a su comportamiento en el ensayo de abrasión en húmedo y relacionada al ensuciamiento de la película de pintura. De esta forma, se recomienda que se realice el ensayo de absorción y velocidad de absorción en las primeras horas en el resto de los materiales y compararlos con patrones de ensuciamiento.
- Se recomienda realizar una evaluación de la adherencia con los sustratos en estudio, en probetas de mezcla asfáltica y de hormigón, en diferentes condiciones de curado, temperatura y humedad ambiente, una vez aplicado el material. El ensayo de adherencia es un ensayo rápido que permite evaluar la compatibilidad con el sustrato y, en las instancias consideradas en la tesis se han tomado condiciones de curado ideales.
- Se implementaron dispositivos de evaluación visual que permiten comparar las muestras (objeto) en las mismas condiciones de iluminación y observador

(cámara). Es conveniente continuar con su implementación con la finalidad de realizar una comparación visual de imágenes digitales.

- El aporte de esta tesis con la implementación de los ensayos viales mencionados en las pinturas de demarcación vial es un gran paso para el estudio del desempeño en servicio de todos los recubrimientos retrorreflectantes. Es importante el desarrollo de una especificación en la cual se contemplen estos ensayos.

Anexo A - Equipos implementados y nuevas metodologías

Dispositivos para generar y evaluar películas de pintura

Dispositivo de aplicación con manija

Existen diversos dispositivos comerciales para la aplicación de las películas de pintura como barras de reducción, aplicador *Doctor Blade* entre otros. En el marco del convenio realizado con Becha SA, la empresa donó a la UTN FRLP un dispositivo para la aplicación de la pintura con la finalidad de lograr espesores uniformes en los ensayos con un ancho de 10 cm. En la Figura A-1 se presenta el mismo, que se denomina “dispositivo de aplicación con manija”. Es muy sencillo de manipular y se utiliza mediante un mecanismo de arrastre. Para comenzar con la aplicación, se apoya el dispositivo sobre el sustrato y se coloca la pintura en la zona de contención. Posteriormente, se desplaza la manija dejando el espesor húmedo de la película de pintura sobre el sustrato.



Figura A-1. Dispositivo de aplicación con manija

Fuente: elaboración propia

De esta manera, la aplicación de la película de pintura con un dispositivo de arrastre da nominalmente una buena película continua, pero se debe tener en cuenta que el espacio entre la barra y el sustrato puede tener poco que ver con el espesor de película obtenido. La velocidad de desplazamiento puede afectar el espesor de la película, ya que la reología del fluido influye en el mismo. Los polímeros de alto peso molecular pueden hacer que los bordes de la película se contraigan y aumenten el espesor de la película húmeda. Es posible que la formulación no moje la barra de estiramiento y, si esto

sucede, agrega otro factor al control del espesor de la película (Joseph, 2015). De todas formas, se resalta en este aspecto la importancia de obtener una película de pintura homogénea y de un espesor constante en las distintas aplicaciones.

Cuando es necesario sembrar microesferas, se utiliza un dispositivo tipo “Salero”. Para materializarlo se utiliza una lata con una perforación para que puedan pasar las microesferas. Con la finalidad de asegurar la dosificación se pesan las microesferas en base a la dosificación deseada y la superficie a cubrir (Figura A-2).

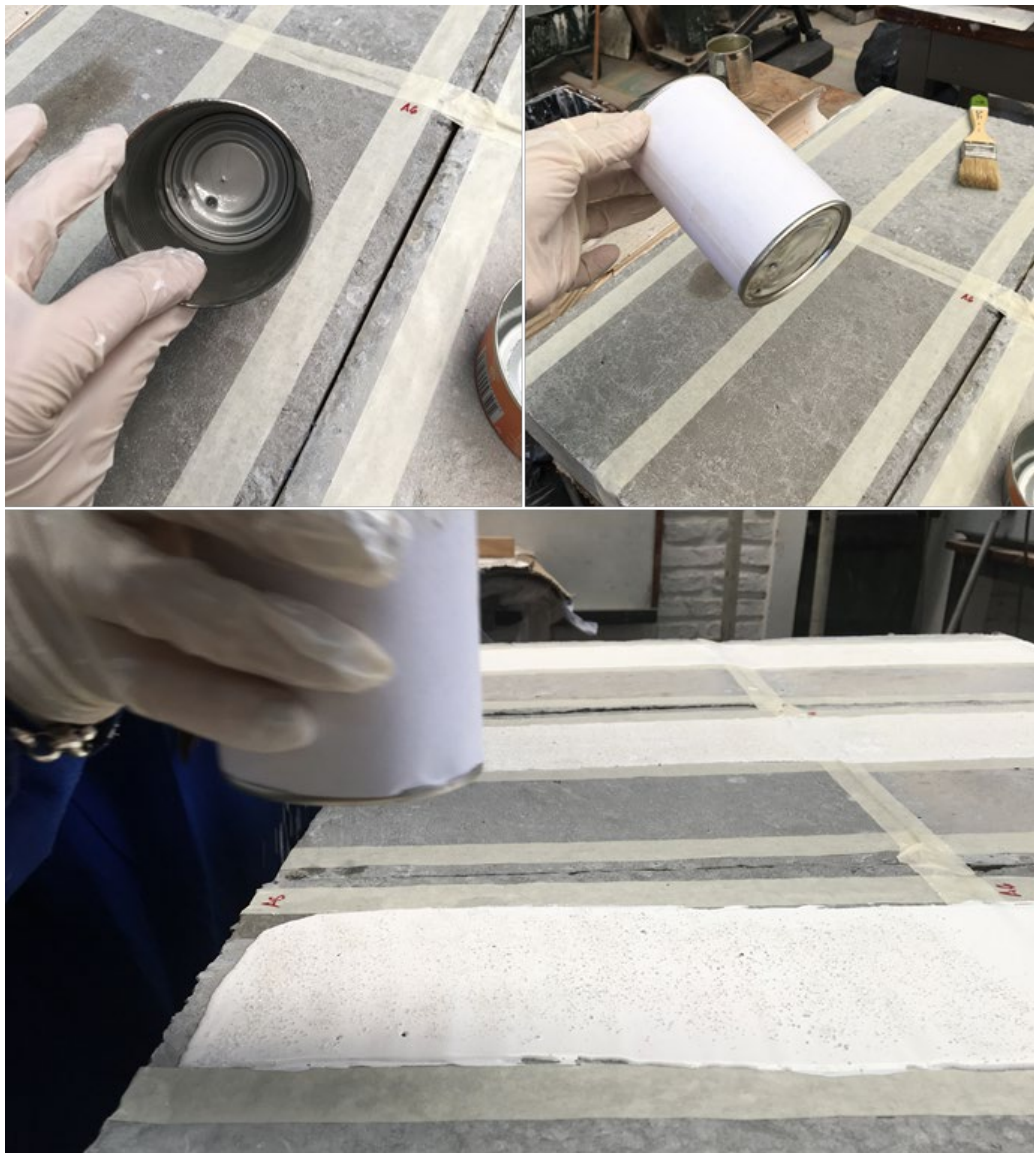


Figura A-2. Dispositivo tipo “salero” para sembrar microesferas

Fuente: elaboración propia

Barra de aplicación

Con la finalidad de generar las muestras del ensayo WTAT es necesario adaptar el mecanismo de aplicación de pintura en un ancho mayor debido a que la superficie de ensayo es más amplia. Para ello, en el LEMaC se adapta una barra de acero y se le reduce el espesor en la zona central. El dispositivo se muestra en la Figura A-3 y en la tesis se denomina como “Barra de aplicación”.



Figura A-3. Barra de aplicación

Fuente: elaboración propia

Como se observa en la Figura A-3, el procedimiento de aplicación consiste en volcar pintura sobre el sustrato y luego se desplaza la barra suavemente, cuidando de mantener la verticalidad, para obtener un espesor homogéneo sobre la superficie de ensayo.

Medición de espesor húmedo

La medición del espesor de la película húmeda proporciona la primera oportunidad en el proceso de aplicación del recubrimiento para verificar el espesor de éste. Dicha medición se puede realizar en la mayoría de los materiales de sustrato, tanto metálicos como no metálicos. Sin embargo, el sustrato debe ser rígido y no propenso a deformarse cuando se aplica el dispositivo de medición.

En los trabajos desarrollados se utiliza el dispositivo tipo *peine*, Figura A-4, para verificar los espesores. Este dispositivo posee dientes o agujas de diferente longitud de modo que cada muesca tenga un espacio diferente a los de sus vecinos. Se destaca que es un dispositivo simple de bajo costo, pero se debe tener en cuenta que los valores brindados por el mismo son aproximados, ya que las muescas tienen valores discretos

y no son continuas en todo el rango de espesor. Para realizar la medición, el *peine* se sumerge verticalmente en la película hasta alcanzar el contacto con la superficie de base, como se muestra en la Figura A-5. La aguja de mayor longitud que no entra en contacto con la pintura indica el espesor de película húmeda.



Figura A-4. Esquema de dispositivo peine

Fuente: Koleske (1995).

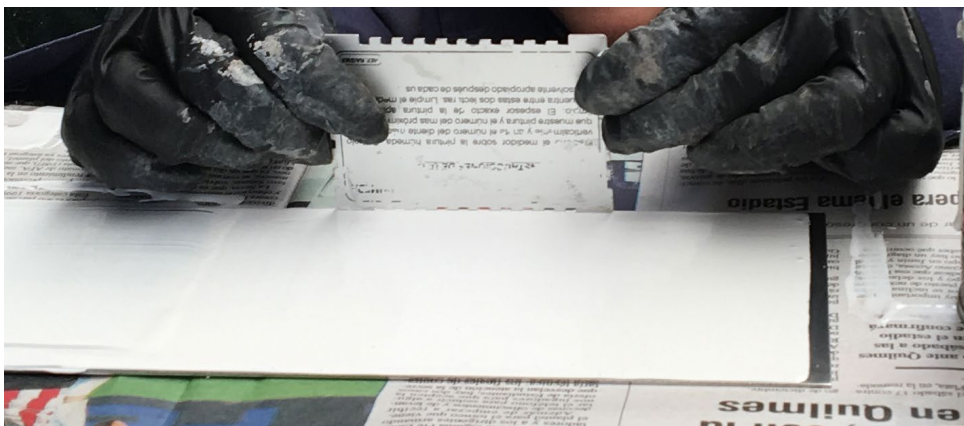


Figura A-5. Medición de película de pintura húmeda con el peine

Fuente: elaboración propia

Dispositivos para la evaluación de las propiedades visuales de los recubrimientos de señalización vial

Introducción

En el transcurso de los primeros ensayos se encuentra la necesidad de obtener una comparación visual de las probetas. Es importante hallar la forma de capturar imágenes en condiciones controladas para que puedan ser comparadas y brinden información del comportamiento en servicio. En base a lo mencionado, se estudió el desarrollo de una cabina que simule las condiciones de iluminación en una vía para realizar comparaciones visuales en condiciones nocturnas y diurnas. Debido a la gran cantidad de ensayos implementados y

a la diversidad del tipo de muestras utilizados en la tesis se implementan varios equipos con distintas consideraciones. Los mismos se detallan en este Anexo y son referenciados a lo largo de la tesis en las instancias que son utilizados.

Cabina de inspección visual

La cabina de inspección visual es la primera cabina desarrollada para la tesis en paralelo con la implementación del ensayo WTT. Su desarrollo surge de la necesidad de obtener una comparación en iguales condiciones, antes y después del ensayo.

La misma se construyó a partir de una caja y, en la parte superior se colocó una lámpara LED de 6500 k de temperatura del color para simular la iluminación diurna. Además, en uno de los laterales se realizó un corte cuadrado para colocar la cámara y poder capturar las imágenes. La cabina se muestra en la Figura A-6 en la cual, se puede observar que se encuentra pintada de negro mate en el interior. Por otro lado, en la Figura A-7 se muestra una fotografía de una probeta tomada en la cámara.

Para la toma de imágenes, el criterio considerado para simular la iluminación diurna es colocar la probeta en la cabina con la lámpara encendida y capturar la imagen con la cámara sin *flash*. Por otro lado, en el caso de las muestras con microesferas de vidrio, las fotos se toman con el *flash* de la cámara y la lámpara led apagada.

Esta cabina se utiliza para la evaluación visual de las probetas de los ensayos WTT y WTAT.



Figura A-6. Cabina de inspección visual construida para el ensayo WTT

Fuente: elaboración propia



Figura A-7. Fotografía de muestra tomada en la Cabina de inspección visual

Fuente: elaboración propia

Esta cabina se realiza de forma rápida ante la necesidad inmediata de comparación visual. Como se desarrolla más adelante, este análisis se continúa y con la ayuda del Centro CODAPLI de la UTN FRLP se diseña una cabina con la finalidad que las fotografías capturadas se adapten a las condiciones de visibilidad viales.

Cabina portátil de inspección visual

Esta cabina surge de la necesidad de comparar muestras de pequeñas dimensiones, como las de Pulimento Acelerado, o zonas puntuales de muestras de mayores dimensiones como en el caso de las muestras realizadas para evaluar el ensuciamiento.

Esta cabina se representa en la Figura A-8 y está conformada por un caño que en su extremo superior posee un orificio para capturar las imágenes y una linterna que ilumina las muestras. La cabina se pinta interiormente con negro mate, al igual que la anterior

y, en el extremo inferior posee una tapa con un recorte cuadrado de 10 cm x 10 cm, realizado para observar las muestras.

Esta cabina tiene la gran ventaja de ser un dispositivo portátil y fácilmente manipulable a diferencia del resto de las cabinas.



Figura A-8. Cabina portátil utilizada para comparación visual

Fuente: elaboración propia

Para la captura de imágenes de las probetas de Pulimento Acelerado se confecciona una plantilla para colocar las distintas muestras en la misma posición al momento de la captura de las imágenes.

Para la comparación de las imágenes se prende la linterna y se coloca la tapa. En el lateral donde se encuentra la linterna existe una perforación que permite colocar la cámara del celular y capturar la foto sin la activación del flash.

Cabina de inspección visual adaptada a las necesidades viales

Los materiales retrorreflectantes han sido creados para mejorar la señalización nocturna (cuando solo son iluminados por las luces de los vehículos). A su vez, los materiales deben mantener su color, es decir, permanecer dentro de las áreas de tolerancia de los colores ordinarios cuando son vistos bajo las condiciones de iluminación diurna. Por esta razón parece correcto indicar que el color debe estar dentro de la tolerancia establecida por los ordinarios, cualquiera sea la condición de observación. Debido a que cambia no solo la composición espectral del iluminante, sino la forma de iluminar (de día la iluminación es en general difusa y, de noche direccional con retrorreflexión), es difícil evaluar estas diferencias perceptibles de un modo instrumental simple.

Lozano (1975), plantea que el método de medición del color de materiales retrorreflectantes es complicado y laborioso debido a que requiere medir con ángulos de incidencia y recolección muy cercanos entre sí y con aperturas muy pequeñas, además del empleo de un colorímetro radiométrico triestímulo (Lozano, 1975).

Para continuar, es necesario profundizar algunos aspectos sobre las normas e instrumentos existentes con la finalidad de poder establecer las condiciones geométricas de medida e iluminantes a utilizar en esta cabina.

Visibilidad diurna

La visibilidad diurna se consigue mediante la aplicación de productos que presenten adecuado contraste con el pavimento sobre el que están colocados. El mismo se logra mediante diferencias de luminosidad y de color. Por este motivo, volvemos a revisar las consideraciones en las evaluaciones de luminancia para adoptar las condiciones geométricas más representativas. En el primer caso se tiene el coeficiente de luminancia β que está relacionado con la geometría 45/0 donde la iluminación se realiza a 45° de la horizontal y el observador se encuentra en la parte superior, según se ilustra en la figura A-9 (Ministerio de Fomento, 2012).

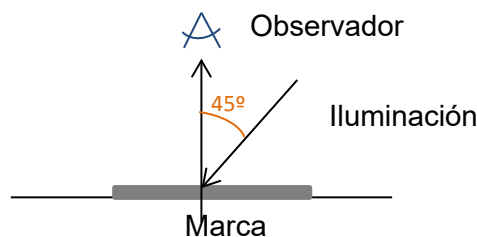


Figura A-9. Condiciones de medida del factor de luminancia β
Fuente: Ministerio de Fomento, 2012 (adaptación propia)

Esta geometría, tiene la ventaja de poderse realizar con equipos comerciales existentes y tiene la característica de reproducir la percepción visual de un peatón situado sobre la marca vial que estaría iluminada con un ángulo de 45° . Pero, no se condice con la percepción de un conductor que la visualiza con un ángulo rasante (Calavia, 1995). Además, es la geometría utilizada para la evaluación de color de un elemento.

Otra forma de evaluar la visibilidad diurna es mediante el coeficiente de luminancia en iluminación difusa (Qd) con observación rasante, el cual reproduce la condición de un conductor (Figura A-10). Si bien esta imagen se presenta en el Capítulo 2 (Figura 2-6), es necesaria reiterarla en este apartado. Además, estos valores son proporcionados por equipos comerciales tales como los retrorreflectómetros y, precisamente se corresponde con uno de los parámetros utilizados en la evaluación de los materiales de la tesis.

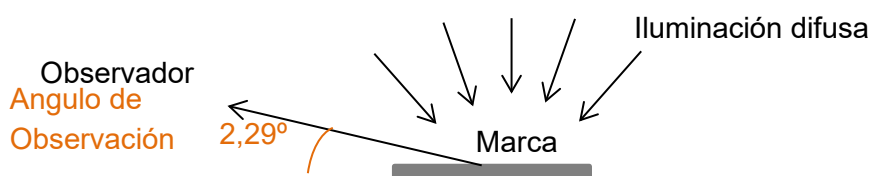


Figura A-10. Condiciones de medida del factor de luminancia en iluminación difusa Qd
Fuente: Ministerio de Fomento, 2012 (adaptación propia)

La norma UNE EN 1436/2009 establece las condiciones de medida de la luminancia en iluminación difusa considerando este ángulo de observación y la utilización de un iluminante estándar D65. Para continuar, es necesario comentar que este iluminante es uno de los estándares propuestos por la CIE (Comisión Internacional de Iluminación) perteneciente a la serie D (“daylight” o “luz de día”). Esta serie corresponde a situaciones de luz de mediodía en distintas latitudes del mundo, que se describen en términos de temperatura de luz (emisiones de luz producidas por un cuerpo negro al someterse a altas temperaturas) (CIE, 2007). El iluminante D65 se corresponde con la luz producida por un cuerpo negro a 6500

Kelvin (la temperatura de color media es de 6504 K), y describe las condiciones medias de iluminación en un mediodía en Europa Occidental (CIE, 2004).

Ésta última, es la geometría que se reproduce para tomar imágenes en la “Cabina de inspección visual adaptada a las necesidades viales” con la finalidad de plasmar en imágenes, la diferencia del aspecto visual en condiciones diurnas de los distintos recubrimientos.

Visibilidad nocturna

Como se desarrolla en el Capítulo 2, la visibilidad nocturna de las marcas viales se consigue mediante la adición de microesferas de vidrio a los materiales base, ya sea en el mismo material (premezclado) o por post mezclado. La medida de desempeño más adecuada de un sistema de demarcación vial es la retrorreflexión, la cual es una medición de la cantidad de luz que es reflejada hacia los ojos del conductor en el momento en que las marcas viales son iluminadas por las luces del vehículo.

Para medir la retrorreflexión existen distintos equipos que simulan las condiciones en las que el conductor visualiza la demarcación vial en la noche. Como se detalla en el Capítulo 2 existe un ángulo en el que las marcas viales son iluminadas por el vehículo y un ángulo de observación, que corresponde a la visual del usuario. Para el desarrollo de la cabina se utiliza la geometría a 30 metros, cuya imagen con la descripción de los ángulos se reitera a continuación en la Figura A-11.



Figura A-11. Geometría a 30 metros según CIE

Fuente: Moreira y Menegon, 2003 (adaptación propia)

La condición de medida normalizada en las Normas UNE EN 1436 (2009), corresponde a la simulación visual a 30 metros, pero se establece considerando los ángulos con respecto a la horizontal como se muestra en la Figura A-12.



Figura A-12. Geometría según la Norma UNE EN 1436

Fuente: Norma UNE EN 1436 (adaptación propia)

De esta forma, se considera la visual de un conductor de un vehículo turismo en el que la altura de los ojos sea de 1,20 m y la de los faros de 0,65 sobre la calzada. Para ello, la norma establece las condiciones de medida para la determinación del coeficiente de luminancia retrorreflejada considerando el ángulo de observación de 2,29 ° con un ángulo de iluminación de 1,24 ° con la utilización de un iluminante estándar A. El iluminante CIE A, definido en 1931, es un intento de describir la iluminación de una típica bombilla de filamento incandescente. Su temperatura de color media es de 2.856 Kelvin. Cualquier fuente luminosa cuya curva de distribución espectral se corresponda suficientemente con los datos del iluminante CIE A se considera una fuente A, y la luz que emite se homologa como A (CIE, 2004).

Condiciones geométricas

Como se comenta en la tesis y en los párrafos anteriores, uno de los principales inconvenientes hallados es la comparación de imágenes y la simulación de la visual de la señalización horizontal que tiene el conductor. Ante la necesidad de la evaluación del comportamiento de las marcas viales, en condiciones de visibilidad diurna y nocturna, y en la búsqueda de lograr un dispositivo de comparación visual en dichas condiciones, se procede al desarrollo de una cabina de inspección visual cumpliendo con los requisitos de geometría e iluminación comentados anteriormente. El observador utilizado será la cámara de un teléfono.

La cabina posee una geometría de 60 cm x 76 cm x 55 cm, y se utilizan dos lámparas fluorescentes tubulares 26 mm (18w/765) como fuente luminosa para representar la luz de día D65. Las mismas se colocan en la cara superior de forma simétrica. Por otro lado, para el iluminante A, inicialmente se eligieron dos lámparas que cumplieran con las condiciones del iluminante. Se encuentra que las mismas, interferían con la luz del *flash*. De esta forma, se hace otra prueba con dos lámparas de filamento blanco utilizadas para autos y motos (E4 209) como fuente luminosa. En todas las pruebas, el iluminante considerado se ubica en la

cara lateral de 60 cm x 55 cm a una altura h_i que depende de la ubicación de la muestra, como se ve en el esquema representado en la Figura A-13, y respetando el ángulo de $1,24^\circ$ establecido en las normas consultadas.

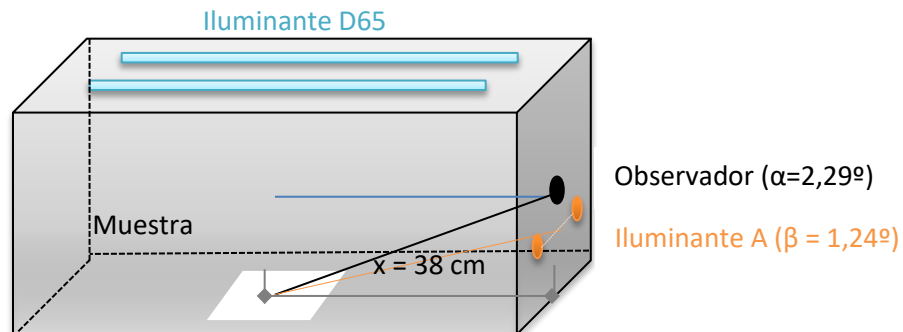


Figura A-13. Esquema de armado de la cámara de inspección simulando condiciones viales

Fuente: elaboración propia

Para la altura del observador se adopta la altura h_o que respeta la ubicación de un conductor de un vehículo según las normas consultadas a $2,29^\circ$. En la figura A-13 se esquematizan fuera de escala los distintos elementos involucrados.

$$h_o = 38 \times \tan 2,29^\circ = 1,51 \text{ cm}$$

$$h_i = 38 \times \tan 1,24^\circ = 0,82 \text{ cm}$$

En la Figura A-14 se presenta la cabina que, como se comenta anteriormente, ha sido diseñada y construida en conjunto con el centro CODAPLI de la UTN FRLP. Como se observa en la misma, en este caso la cámara también se pinta en la parte interior de color negro mate. Este procedimiento, continúa en estudio debido a que el proyecto cuenta con la idea de adaptar una cámara y una computadora para que la evaluación pueda ser tomada en las mismas condiciones por cualquier persona sin depender del dispositivo.

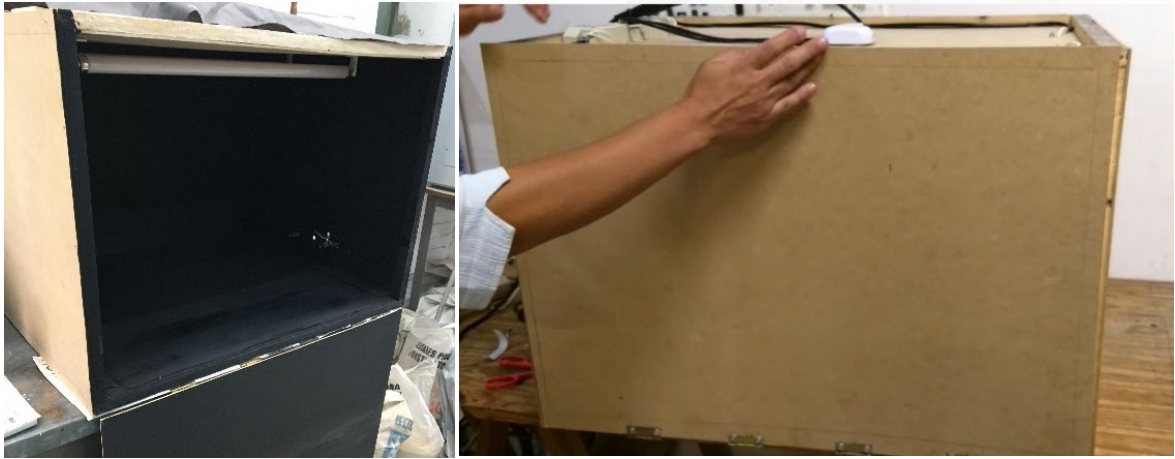


Figura A-14. Cámara de inspección visual

Fuente: elaboración propia

Referencias

CALAVIA D., "Demarcación horizontal – Seguridad vial – La visibilidad de las marcas viales – Aspectos fotométricos – Retrorreflexión", Revista Carreteras, Argentina, n 145, pp. 47 a 55, 1995.

CIE 15. Colorimetry. 3rd Edition ed. 2004, CIE Central Bureau: Vienna, 2004.

CIE, "Standard Illuminants for Colorimetry". ISO, 11664–2, 2007.

Lozano, R. D., "Measurement standards for retroreflective materials used on road signs", Lighting Research & Technology, 8(2), 107-112, 1976.

MINISTERIO DE FOMENTO, "Guía para el proyecto y ejecución de obras de señalización horizontal", Editorial Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento (ISBN 978-84-498-0926-2), España, 2012.

MOREIRA H. Y MENEGON R., "Sinalização Horizontal", São Paulo: Master Set Gráfica, 2003.

UNE, "Norma UNE EN 1436: Materiales para señalización vial horizontal. Comportamiento de las marcas viales aplicadas sobre la calzada y métodos de ensayo", 2009.

Anexo B - Estudio de la valoración de la retroreflexión

Introducción

Se ha visto, que los requisitos esenciales de las marcas viales son sus características de visibilidad (diurna y nocturna), de resistencia al deslizamiento y de durabilidad; siendo características propias de cada sistema. La distancia de visibilidad en condiciones de iluminación diurna se consigue mediante marcas viales que presenten un adecuado contraste con el pavimento sobre el que están colocados. En cambio, la visibilidad nocturna tiene lugar cuando la iluminación de la marca vial se realiza desde los faros del vehículo.

Un aspecto por considerar es que las luces bajas de los faros de los vehículos presentan una asimetría en la geometría de los mismos. La misma que genera una diferencia en la distancia de visibilidad entre las líneas derecha o la izquierda. Las distancias de visibilidad aproximadas son 60 metros con el faro izquierdo y 100 metros con el faro derecho. Es decir que, en la línea de eje, no es factible obtener una larga visibilidad. Los resultados de los estudios realizados en Europa con respecto a la distancia de visibilidad indican que existen dos formas para aumentar la misma en condiciones nocturnas: aumentar el coeficiente de retroreflexión o aumentar el ancho de la marca (Edelmuth, 2006).

En el Capítulo 2 de la tesis, se ha introducido en la temática de los distintos elementos relacionada con las propiedades esenciales. También, se sabe que las características ópticas y la geometría de las marcas viales deben cumplir ciertos requisitos para que sean visibles a una distancia suficiente. Cuanto mayor sean las propiedades retroreflectivas de las marcas viales mayor será su relación de contraste y, por lo tanto, mayor será su distancia de visibilidad. Cuanto mayor sea su ancho, más nítida será la percepción del conductor. De acuerdo con las conclusiones del grupo de expertos de la C.I.E., que han estudiado los aspectos visuales de las marcas viales, para que un conductor pueda maniobrar el volante de una manera eficaz, se requiere un tiempo de previsualización mínimo de entre 3 y 5 segundos. Para las condiciones de conducción habituales, esto equivale a 150 m.

Para poder definir las propiedades ópticas que deben tener las marcas viales para que sean visibles a esa distancia, es necesario fijar previamente los anchos de líneas y

geometría de otras marcas particulares. Los anchos de línea están, generalmente, definidos en documentos diferentes, y más por criterios economicistas que por criterios técnicos, tendiéndose a aplicar anchos de línea lo más estrechos posibles. Cuando estas marcas estrechas pierden, por el uso, sus características iniciales (aun manteniéndose por encima de los mínimos establecidos), su distancia de visibilidad puede descender más de la mitad, por lo que su eficacia queda dañada. A título de orientación, en la Tabla B-1 se indican los anchos de líneas apropiados de acuerdo con los requisitos de visibilidad diurna y nocturna vigentes en ese momento (Calavia, 1995).

Tabla B-1. Anchos de línea de acuerdo con los requisitos de visibilidad diurna y nocturna

Fuente: Calavia, 1995 (adaptación propia)

Tipo de banda	Velocidad km/h	Ancho de línea: cm
Banda lateral	120	30
Banda lateral	80	20
Banda de eje	120	15
Banda de eje	80	10

Es conocida la importancia en la normalización de las características de la señalización horizontal, la adecuación a cada región y necesidad específica y el establecimiento de cronogramas de mantenimiento adecuados. Estos aspectos son de gran importancia a fines de proveer seguridad a los usuarios de las vías, especialmente en horas de la noche.

El objetivo de este trabajo es abordar la temática de valoración de las propiedades esenciales mediante el análisis de dos aspectos. Por un lado, con la idea de obtener una metodología de análisis que permita generar cronogramas de mantenimientos adecuados para facilitar el manejo de los datos, se procesan los resultados de retrorreflexión obtenidos en diversos tramos de ruta con el equipo de tipo de dinámico de la Dirección de Vialidad Nacional sobre marcas existentes. Por otro lado, se pretende obtener una metodología de análisis para verificar materiales y dosificaciones de microesferas. Para ello se analiza en laboratorio la aplicación sobre probetas de diversas pinturas sobre las que se siembran microesferas en distintas dosificaciones, con el fin de optimizar la obtención de los parámetros esenciales (retrorreflexión y luminancia en iluminación difusa y resistencia al deslizamiento mediante péndulo inglés) y evaluar la posibilidad de relacionarlos con fotografías obtenidas en una “Cabinas de

inspección visual adaptada a las necesidades viales” presentada en el Anexo A. Estos trabajos se realizan con la colaboración del Laboratorio de Acústica y Luminotecnia de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia (LAL CIC) y el centro CODAPLI de la UTN FRLP.

Metodología para la valoración de la retrorreflexión

Para abordar la temática de valoración de las propiedades esenciales, y unificar criterios, se instrumentan dos tareas principales. En primer lugar, se analiza la forma de procesamiento de las medidas de retrorreflexión con equipos dinámicos. Y, por otro lado, se analiza en laboratorio la aplicación sobre probetas de diversas pinturas sobre las que se siembran microesferas en distintas dosificaciones, con el fin de optimizar la obtención de parámetros esenciales y lograr una comparación visual de las mismas.

A) Procesamiento con equipos dinámicos

Se procesan datos de la medida de retrorreflexión en el tiempo evaluada con equipos dinámicos de Vialidad Nacional. Para la comparación de los resultados, debido a la gran cantidad de valores se procede a la tramificación de los resultados. Para ello, se utiliza el método de las Diferencias Acumuladas, herramienta utilizada en el ámbito vial y que permite delimitar estadísticamente tramos homogéneos utilizando mediciones del parámetro considerado. Este método es utilizado para una gran variedad de mediciones de respuesta de pavimentos (como deflexiones, fricción, etc.).

El procedimiento adoptado consiste en graficar las sumas acumuladas y observar los cambios de pendiente. Para ello, en principio se calcula el promedio de los valores de retrorreflexión en el eje. Luego, se considera este promedio y se le resta el primer valor de retrorreflexión, cuyo resultado se denomina “promedio Y acumulado” de la primer progresiva. En los pasos siguientes el mecanismo consiste en sumar al valor “promedio y acumulado” de la progresiva anterior, la diferencia entre el valor promedio calculado inicialmente y el valor de la retrorreflexión en la progresiva en estudio. Así, se conforma un gráfico donde se coloca en el eje abscisas las progresivas y en el eje de ordenadas los valores “promedio Y acumulados” obtenidos. Finalmente, se analizan las zonas con cambios de pendiente, registrándose las progresivas en que ocurren los mismos para luego calcular el promedio, desviación estándar y valor característico de los tramos así obtenidos. En este caso, para el cálculo del valor característico se considera el valor

que es superado el 85%. Para el análisis se utilizan datos de retrorreflexión medidos en los años 2015, 2016, 2017 y 2018.

Debido a que se tienen datos de las mismas trazas en años consecutivos, resulta interesante conocer la variación de la retrorreflexión en el tiempo. Para ello, se calcula el porcentaje de pérdida de retrorreflexión en cada tramo determinado en cada año con respecto al año 2015. El mecanismo de cálculo de la pérdida de retrorreflexión (P) de cada año se calcula de acuerdo con la Ecuación B-1.

$$P (\%) = (RL_{\text{año}} - RL_{2015}) / RL_{2015} * 100 \quad (\text{B-1})$$

Donde $RL_{\text{año}}$ corresponde al valor característico de retrorreflexión en un tramo del año que se quiere calcular y, RL_{2015} corresponde al valor característico del año inicial de los datos. De esta forma, se confecciona una nueva tabla con las pérdidas porcentuales de cada año (en nuestro caso años 2016, 2017 y 2018).

B) Evaluación de los parámetros esenciales en probetas confeccionadas en laboratorio

Se pintan placas de hormigón con pintura acrílica base solvente S1 y base acuosa A3 con microesferas sembradas. El procedimiento para pintar las placas se observa en la Figura B-1.



Figura B-1. Pintura de probetas con distintas dosificaciones de microesferas

Fuente: elaboración propia

Se preparan las placas de hormigón con una superficie de 30 cm x 30 cm y se coloca cinta para delimitar las zonas a pintar. Se pesan las microesferas considerando la superficie en la cual se aplica la pintura y la dosificación elegida en g/m². La pintura, en todos los casos, se aplica con el Dispositivo de aplicación con manija con la finalidad de obtener un espesor uniforme, e inmediatamente se siembran las microesferas con un Dispositivo tipo “salero”. Estos dispositivos se describen en el Anexo A. En la Tabla B-2 se presentan los materiales utilizados para todas las probetas confeccionadas con las dosificaciones consideradas.

Tabla B-2. Descripción de materiales y dosificación de microesferas en las muestras
Fuente: elaboración propia

Muestra	Materiales Pintura/microesfera	Dosificación de Microesferas (g/m ²)
MA1	S3 / ECH-20-WBP	300
MA2	S3 / ECH-20-WBP	500
MA3	S3 / ECH-20-WBP	600
MA4	S3 / ECH-20-WBP	700
MA5	S3 / ECH-20-WBP	800
MA6	S3 / ECH-20-WBP	900
MA7	S3 / ECH-20-WBP	571
MA8	S3 / ECH-20-WBP	350
MS1	S1 / TAF-S2	300
MS2	S1 / TAF-S2	500
MS3	S1 / TAF-S2	600
MS4	S1 / TAF-S2	700
MS5	S1 / TAF-S2	800
MS6	S1 / TAF-S2	900

Confeccionadas las muestras, se evalúa la resistencia al deslizamiento con el péndulo inglés, en unidades SRT, de acuerdo con la norma IRAM 1555/1998 pero aplicado a marcas viales como se realiza en el Capítulo 4. Con la finalidad de evaluar la retrorreflexión se utilizan dos equipos según la disponibilidad. El equipo Mirolux de LAL-CIC que brinda la retrorreflexión con geometría a 15 metros y el equipo EASYLUX que brinda resultados de retrorreflexión con geometría a 15 m y a 30 m (RL15 y RL30) y luminancia en iluminación difusa (Qd). Por último, para la comparación visual de las

muestras se utiliza la Cabina de inspección visual adaptada a las necesidades viales explicada en el Anexo A.

Resultados y discusión

A) Procesamiento con equipos dinámicos

En la Figura B-2 se presentan las curvas con los valores de retrorreflexión obtenidos en los 4 años en estudio en una Ruta Nacional donde se aplicó material termoplástico. Se observa que es complicado el análisis de los valores donde cada curva representa los valores en el mismo kilómetro en distintos años.

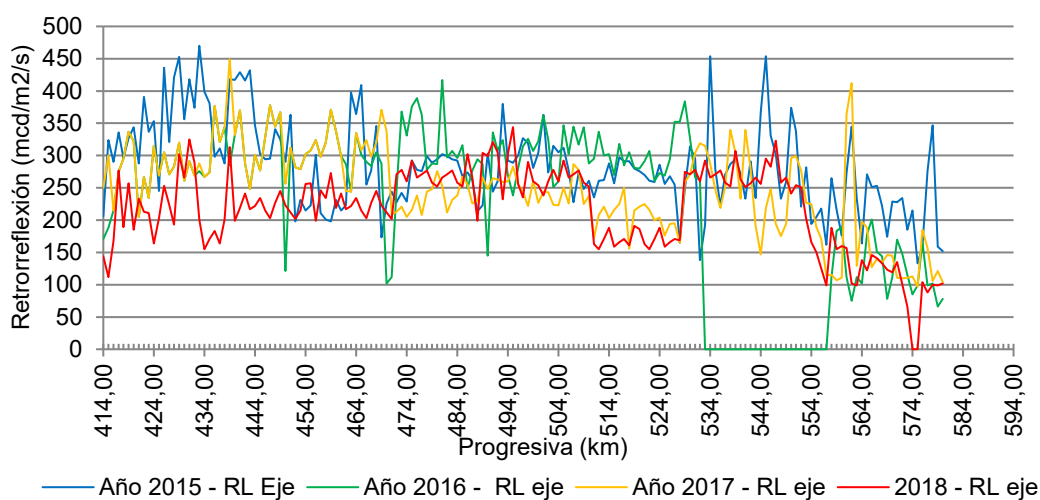


Figura B-2. Retrorreflexión medida en el eje de una Ruta Nacional con equipo dinámico en distintos años

Fuente: Dirección de Vialidad Nacional (adaptación propia)

Luego, en la Figura B-3, Figura B-4, Figura B-5 y Figura B-6 se presentan los gráficos de los datos de retrorreflexión acumulados de los años 2015, 2016, 2017 y 2018 respectivamente.

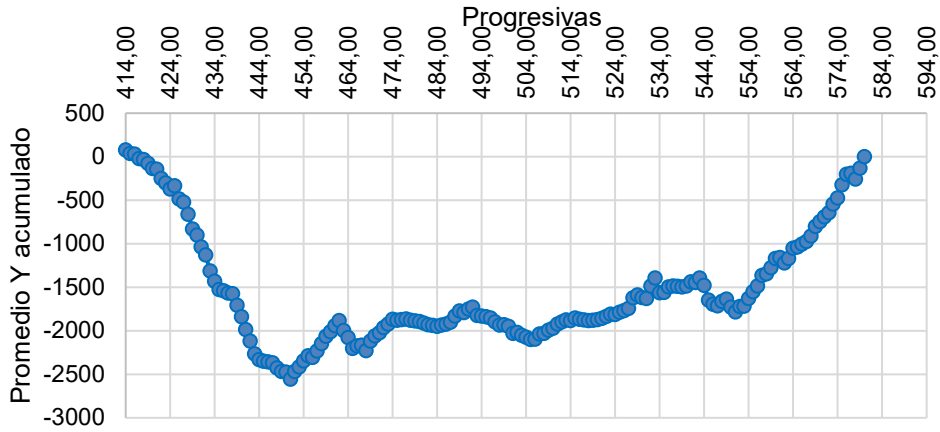


Figura B-3. Promedio Y acumulado de los datos correspondientes al año 2015
Fuente: Vialidad Nacional (adaptación propia)

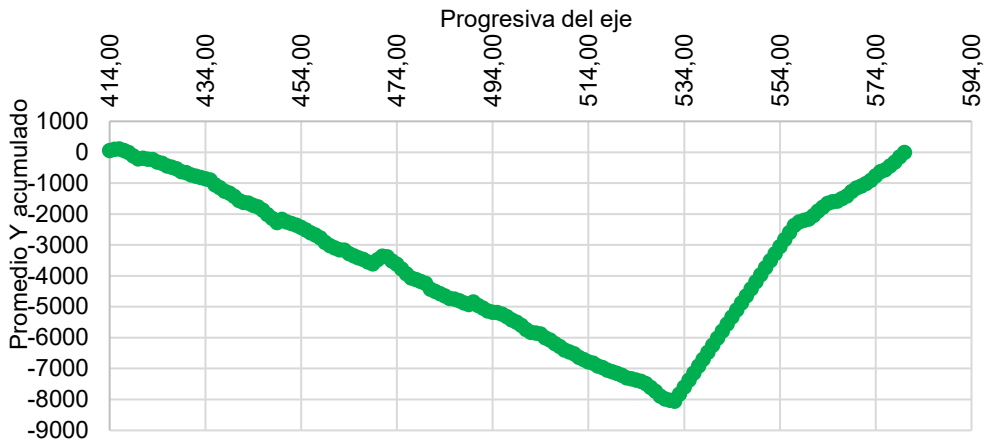


Figura B-4. Promedio Y acumulado de los datos correspondientes al año 2016
Fuente: Vialidad Nacional (adaptación propia)

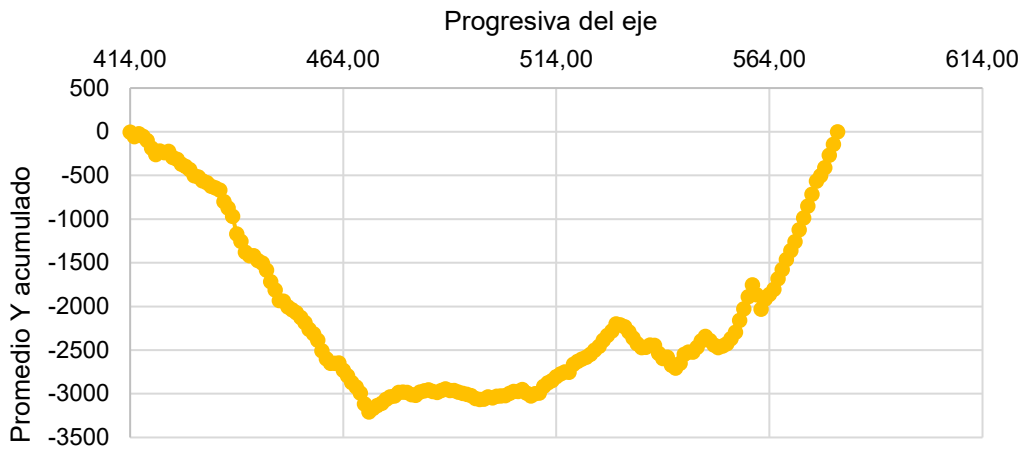


Figura B-5. Promedio Y acumulado de los datos correspondientes al año 2017
Fuente: Vialidad Nacional (adaptación propia)

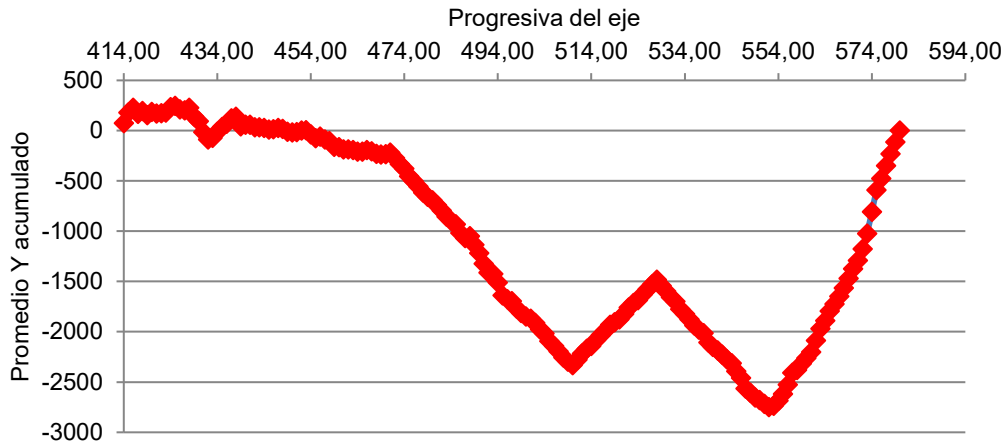


Figura B-6. Promedio Y acumulado de los datos correspondientes al año 2018

Fuente: Vialidad Nacional (adaptación propia)

Luego, de acuerdo con lo enunciado en la metodología, se verifica la ordenada en cada cambio de pendiente y se calcula el promedio, desviación estándar y el valor característico de cada tramo. De esta forma, queda conformada la Figura B-7 con los tramos correspondiente a cada año.

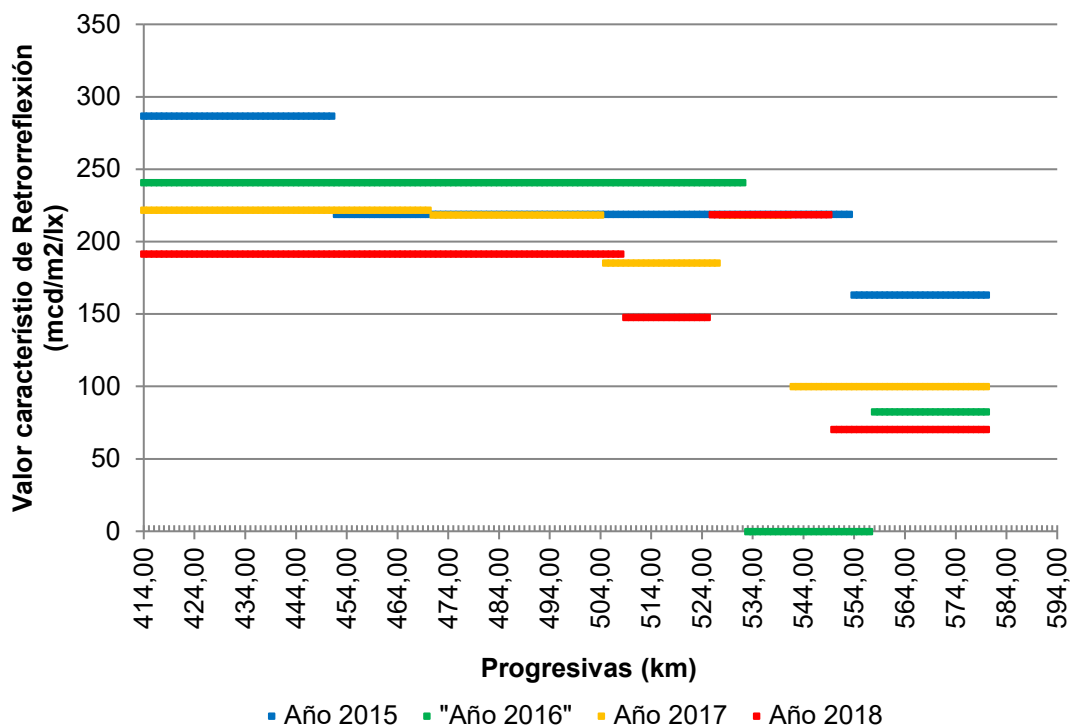


Figura B-7. Valores característicos de la Retroreflexión de los años en estudio obtenida por esta metodología

Fuente: Vialidad Nacional (adaptación propia)

Se puede observar que la tramificación de los resultados permite visualizar con mayor facilidad, la variación de la retrorreflexión en las rutas y detectar a simple vista zonas más comprometidas. Por ejemplo, del análisis de la Figura B-7 surge que la zona más comprometida será el tramo correspondiente a la zona entre las progresivas del km 540 y el km 584.

El paso siguiente, para la evaluación de la pérdida de retrorreflexión, consiste en confeccionar una nueva tabla con el porcentaje de pérdida de cada año con respecto al primer año (en este caso 2015). En la Tabla B-3 queda expuesto el mecanismo considerado para determinación del porcentaje de pérdida de retrorreflexión.

Tabla B-3. Determinación de la pérdida de retrorreflexión en cada tramo
Fuente: elaboración propia.

Tramo		2015	2016	2017	2018
1	RL característica	287	241	222	191,62
	Pérdida (%)	0	16,0	22,6	33,2
2	RL característica	219	241	218,48	191,62
	Pérdida (%)	0	-10,05	0,24	12,50
3	RL característica	219	241	185,5	148
	Pérdida (%)	0	-10,05	15,30	32,42
4	RL característica	219		218,48	218,84
	Pérdida (%)	0		0,24	0,07
5	RL característica	163	83	100	70,5
	Pérdida (%)	100	49,08	38,65	56,75

De esta manera se confecciona la Figura B-8, que presenta los valores resultantes de considerar la pérdida de retrorreflexión de los distintos años con respecto al año 2015. En el eje de abscisas se consideran la cantidad de años consideradas para el cálculo de la pérdida.

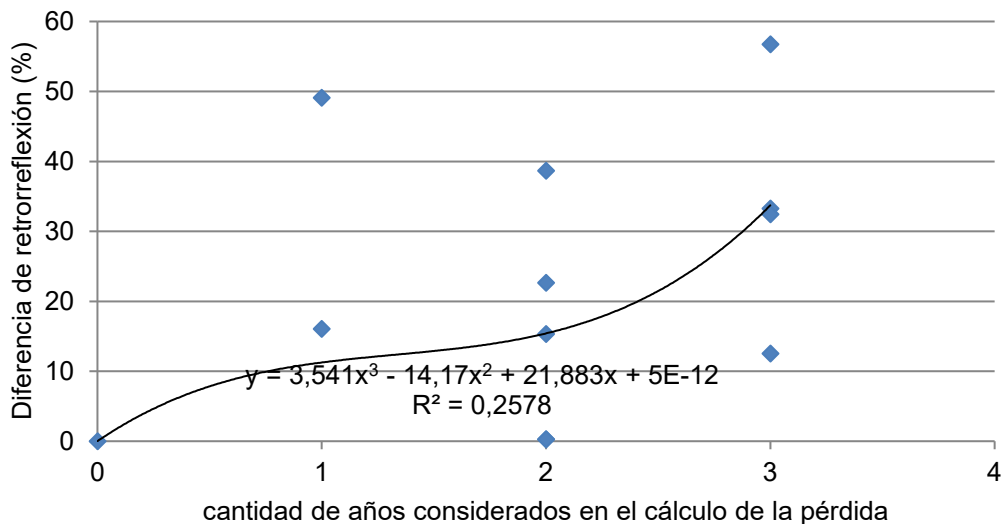


Figura B-8. Pérdida porcentual de Retrorreflexión en el transcurso de los años en estudio

Fuente: elaboración propia

Como es de esperar, se observa que la curva de deterioro de la retrorreflexión se asemeja a la típica curva que se obtiene en la evaluación de deformación plásticas de pavimentos flexibles. En el Capítulo 2 se hace referencia a los modelos de degradación de la retrorreflexión, pero en este caso no es mediante el análisis de pérdida en porcentaje sino en disminución del valor en cuestión. De todas formas, podemos ver que los valores a partir de un momento disminuyen de forma abrupta, aspecto que coincide con el aumento de la pérdida en este caso.

B) Evaluación de los parámetros esenciales en probetas confeccionadas en laboratorio

Los resultados de la evaluación de la retrorreflexión en las probetas pintadas con distintas dosificaciones se muestran en la Figura B-9. En la misma, se detallan los valores de retrorreflexión en ambas geometrías, es decir con geometría “a 15 m” y “a 30 m”. Se puede observar que con las microesferas utilizadas en las pinturas base acuosa se obtiene un valor mayor de retrorreflexión que en el caso de la pintura base solvente para la misma dosificación. Por otro lado, se observa que se obtiene un máximo de retrorreflexión con una dosificación de 500-600 g/m² microesferas. Cabe destacar que en el caso de los 800 g/ m² se descartan los resultados que podrían deberse a un error.

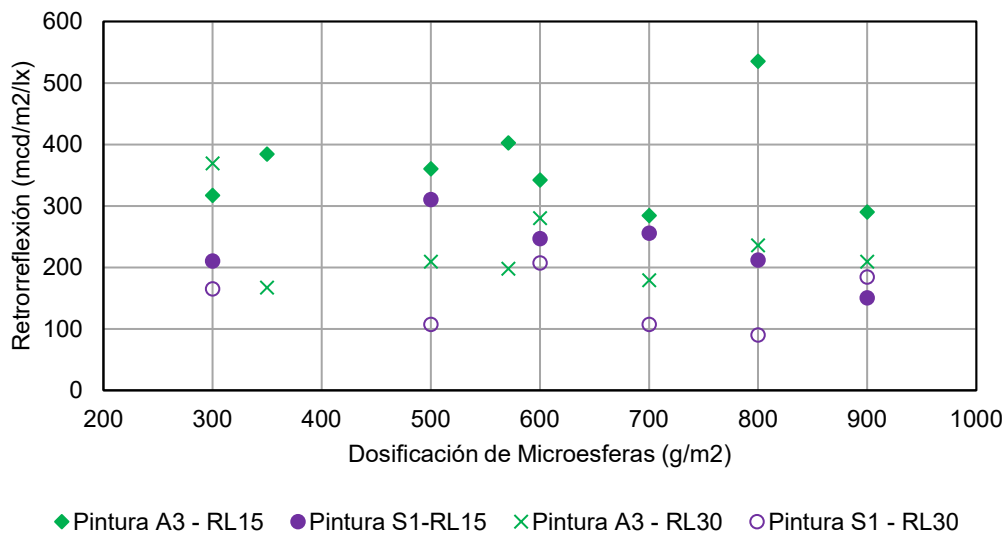


Figura B-9. Variación de la retroreflexión en función de la dosificación de microesferas
Fuente: elaboración propia

Los valores de Luminancia en iluminación difusa Qd en función de la dosificación de microesferas se presenta en la Figura B-10. Se puede observar que los valores cumplen ampliamente con los mínimos establecidos por la Norma UNE 1436/09. Además, el valor de Qd presenta un promedio de 299 mcd/m²/lx en el caso de la pintura base solvente S1 y de 291 mcd/m²/lx en el caso de la pintura acuosa A3. En ambos casos con una desviación estándar de 24 mcd/m²/lx. De esta forma, no se evidencia una gran relación entre la dosificación de las microesferas y la luminancia en iluminación difusa.

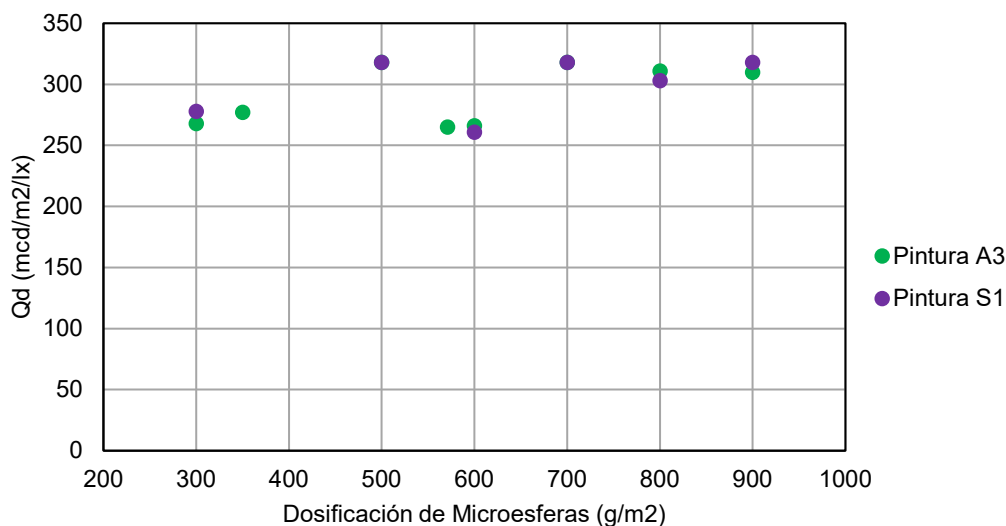


Figura B-10. Variación de la Luminancia en iluminación difusa en función de la dosificación de microesferas
Fuente: elaboración propia

De la variación de la resistencia al deslizamiento con las distintas dosificaciones se observa que en el caso de la pintura base acuosa se obtiene un valor promedio de 46,2 SRT con un desvío de 2,3 SRT. Con la pintura base solvente se obtiene también un valor promedio de 53,1 SRT pero con un desvío de 3,5 SRT.

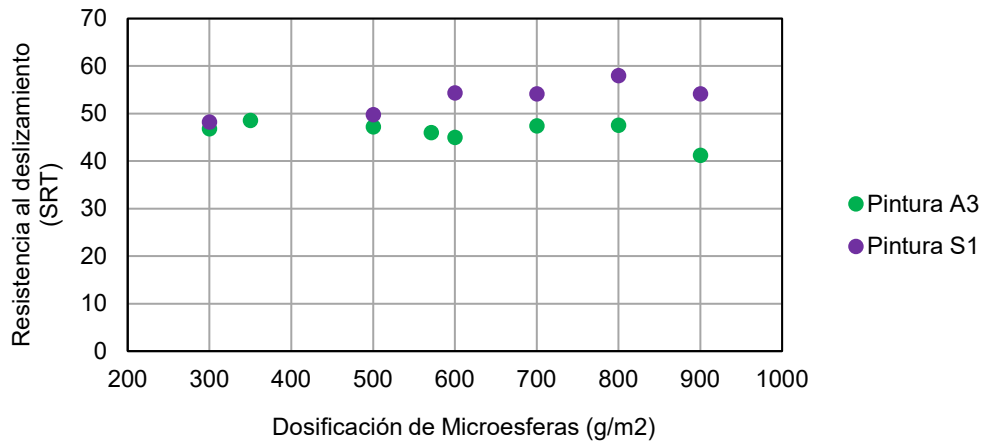


Figura B-11. Variación de la Luminancia en iluminación difusa en función de la dosificación de microesferas

Fuente: elaboración propia

A continuación, en la Figura B-12 a Figura B-13 se presentan las imágenes de cada una de las probetas tomadas en la Cabina de inspección visual adaptada a las necesidades viales con los valores de los parámetros obtenidos.

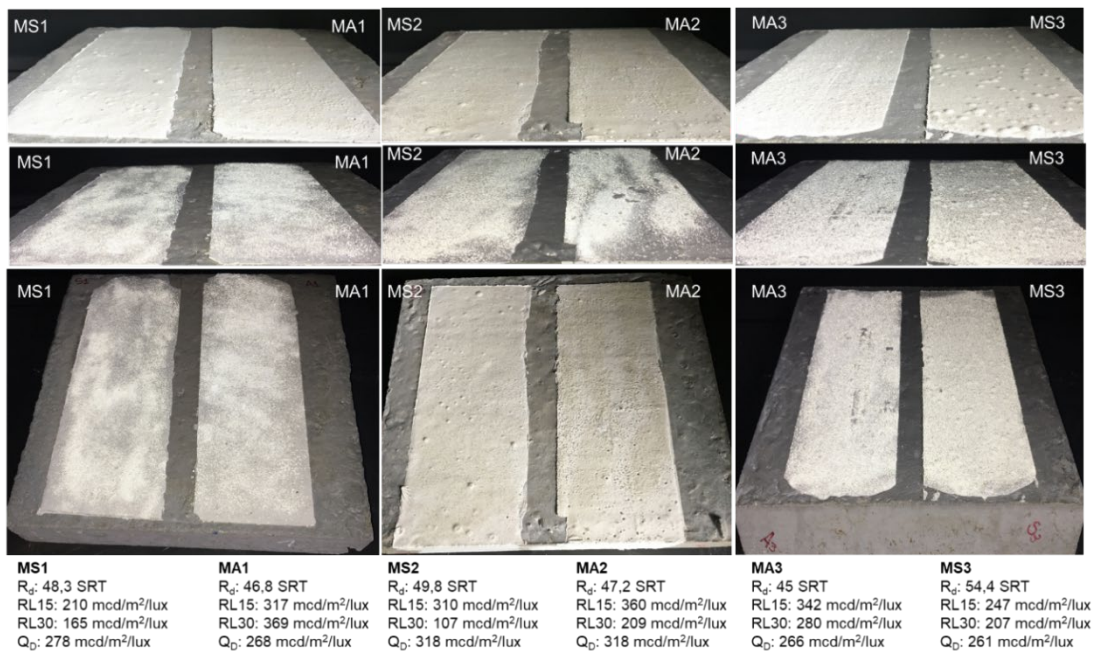


Figura B-12. Comparación visual en la cabina de las probetas confeccionadas

Fuente: elaboración propia

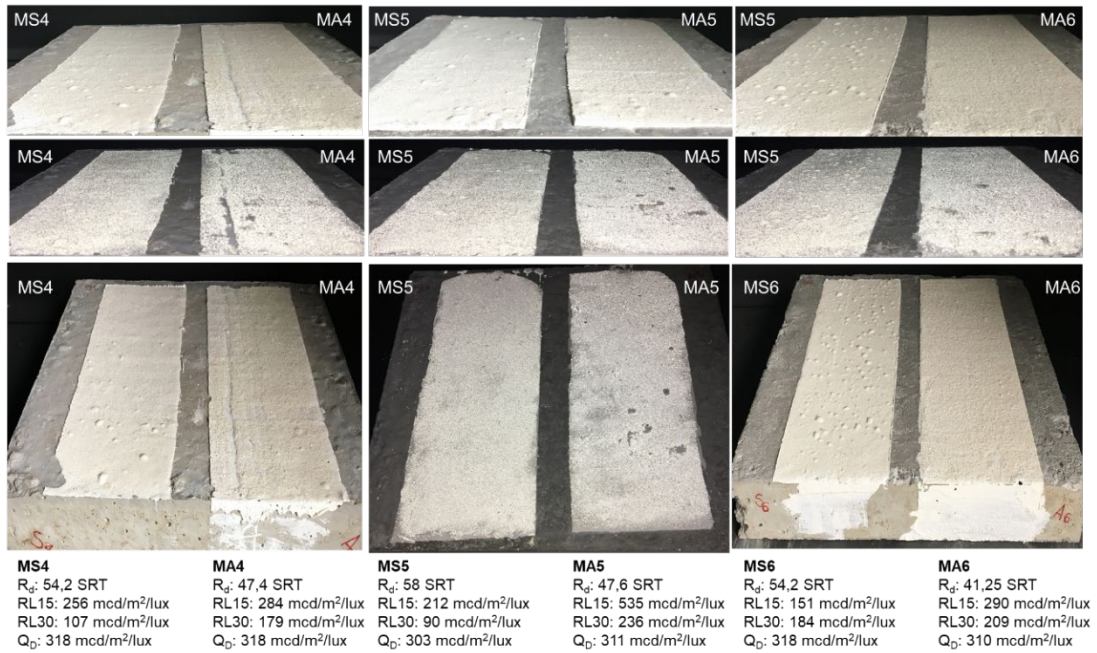


Figura B-13. Comparación visual en la cabina de las probetas confeccionadas

Fuente: elaboración propia

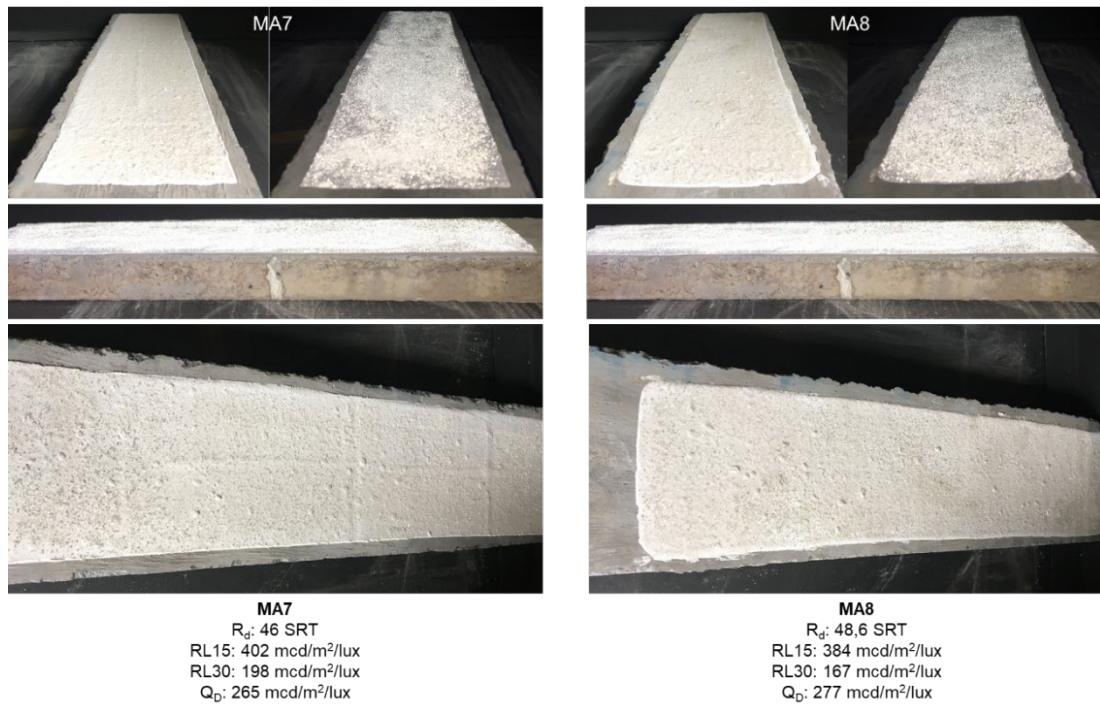


Figura B-14. Comparación visual en la cabina de las probetas confeccionadas

Fuente: elaboración propia

De las Figuras no es posible sacar una conclusión global que relacione los valores obtenidos. Podría recomendarse realizar dosificaciones menores para obtener una mayor diferencia visual en la retrorreflexión.

Conclusiones

Se destaca que el procedimiento estadístico propuesto para procesar los datos dinámicos de retrorreflexión permite evidenciar más fácilmente tramos comprometidos y, por otro lado con el procesamiento de los mismos es posible confeccionar curvas de deterioro.

Para el caso de las muestras realizadas en laboratorio se destaca que no se observa una gran dispersión en los resultados de luminancia y resistencia al deslizamiento y que si bien se obtiene dispersión en la retrorreflexión se observa que en dosificaciones superiores a 600 g/m² no se obtienen beneficios y, por el contrario los valores disminuyen. Se considera que éste, puede ser un método útil para obtener una aproximación a la dosificación más eficiente de microesferas y que permite evaluar distintas combinaciones de pintura y tipo de microesferas.

Referencias

CALAVIA D., "Demarcación horizontal – Seguridad vial – La visibilidad de las marcas viales – Aspectos fotométricos – Retrorreflexión", Revista Carreteras, Argentina, n 145, pp. 47 a 55, 1995.

CALAVIA D., "Demarcación Horizontal", Revista Carreteras, Argentina, n 157, pp. 58 a 66, 1999.

CHÁVEZ, O., "Propuestas de mejoras y estandarización de la señalización horizontal en Argentina", (fuente: http://www.institutoivia.com/cisev-ponencias/analisis_accidentes_aa/olga_fernandez.pdf).

EDELMUTH A., "Como se mide la visibilidad de la demarcación", Revista Carreteras, Argentina, n 182, pp. 61 a 66, 2006.

IRAM. "Norma IRAM 1555: Agregados. Determinación del coeficiente de resistencia al deslizamiento con el péndulo TRRL.", 1998.

AGRADECIMIENTOS	5
RESUMEN	7
1 - INTRODUCCIÓN	1
1.1. LA TEMÁTICA ANALIZADA Y EL ENFOQUE ADOPTADO	1
1.2. ANTECEDENTES EN LA EVALUACIÓN DE LOS MATERIALES DE DEMARCACIÓN VIAL	7
1.3. OBJETIVOS DE LA TESIS.....	12
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	12
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
1.4. CONTENIDO Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	13
2 - ESTADO DEL ARTE	19
2.1. INTRODUCCIÓN	19
2.2. RECUBRIMIENTOS RETRORREFLECTANTES.....	19
2.2.1. PINTURAS	20
2.2.2. TERMOPLÁSTICOS	23
2.2.3. PLÁSTICOS EN FRÍO.....	25
2.2.4. MICROESFERAS DE VIDRIO.....	27
2.3. PROPIEDADES DE LAS MARCAS VIALES	29
2.3.1. VISIBILIDAD	30
2.3.1.1. VISIBILIDAD DIURNA.....	31
2.3.1.2. VISIBILIDAD NOCTURNA – RETRORREFLEXIÓN.....	33
2.3.2. RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO	42
2.4. FACTORES QUE AFECTAN A LOS MATERIALES DE SEÑALIZACIÓN VIAL.....	43
2.4.1. ACCIÓN CLIMÁTICA SOBRE LA DEMARCACIÓN.....	43
2.4.2. MATERIAL UTILIZADO EN LA DEMARCACIÓN	44
2.4.3. TIPO DE PAVIMENTO Y TEXTURA SUPERFICIAL.....	45
2.4.4. POSICIÓN DE LA DEMARCACIÓN	48
2.4.5. ACCIÓN DEL TRÁNSITO (VOLUMEN Y COMPOSICIÓN).....	48
2.5. ESTUDIO DE LA ABRASIÓN EN PINTURAS	49
2.6. MODELOS DE DEGRADACIÓN DE LA RETRORREFLEXIÓN.....	50
3 - EVALUACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS DE DEMARCACIÓN VIAL	57
3.1. INTRODUCCIÓN	57
3.2. DESEMPEÑO DE LOS MATERIALES VIALES	58
3.3. ESPECIFICACIONES SOBRE PINTURAS DE DEMARCACIÓN VIAL	60
3.4. TECNOLOGÍAS UTILIZADAS PARA LA EVALUACIÓN DE LOS MATERIALES	63
3.4.1. ENSAYO DE REFERENCIA.....	64
3.4.2. PRUEBAS DE CAMPO	65
3.4.3. SIMULADORES DE DESGASTE.....	70
3.4.4. ABRASIÓN POR EL MÉTODO DE CAÍDA DE UN ABRASIVO	73
3.4.5. ABRASIÓN POR EL MÉTODO TABER ABRASER	74
3.4.6. COMENTARIOS SOBRE LOS ENSAYOS NORMALIZADOS	76
3.5. METODOLOGÍAS ALTERNATIVAS A IMPLEMENTARSE	79
3.5.1. IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO WHEEL TRACKING TEST (WTT).....	79
3.5.2. IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO DE ABRASIÓN POR VÍA HÚMEDA WTAT	81
3.5.3. IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO DE PULIMENTO ACELERADO.....	82
3.5.4. ENSAYOS COMPLEMENTARIOS	89

4 - CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES, METODOLOGÍA Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	93
4.1	INTRODUCCIÓN 93
4.2	MATERIALES UTILIZADOS PARA CONFORMAR LOS RECUBRIMIENTOS EN LA TESIS..... 93
4.3	ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN Y DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LAS PINTURAS 98
4.3.1	ESPECTROSCOPIA INFRARROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)..... 99
4.3.2	CONTENIDO DE SÓLIDOS EN MASA 101
4.3.3	DURÓMETRO DE PENETRACIÓN BUCHHOLDZ 102
4.3.4	PROPIEDADES VISUALES 104
4.3.4.1	COLOR 105
4.3.4.2	BRILLO 105
4.3.4.3	ASPECTO VISUAL 106
4.3.5	MICROSCOPIA ÓPTICA Y ELECTRÓNICA DE BARRIDO 109
4.3.6	ENSAYOS DE RESISTENCIA AL ATAQUE QUÍMICO 112
4.4	ENSAYOS PARA EVALUAR LA DURABILIDAD DE LOS RECUBRIMIENTOS RETRORREFLECTANTES 114
4.4.1	ENSAYO WHEEL TRACKING TEST (WTT)..... 114
4.5	EVALUACIÓN DE LA ABRASIÓN DE LOS MATERIALES UTILIZADOS PARA DEMARCACIÓN VIAL .129
4.5.1	ENSAYO TABER ABRASER..... 129
4.5.2	ENSAYO DE ABRASIÓN POR VÍA HÚMEDA WTAT 132
4.5.2.1	ENSAYO DE ABRASIÓN POR VÍA HÚMEDA WTAT DE UN SISTEMA DE DEMARCACIÓN HORIZONTAL..... 132
4.5.2.2	ENSAYO DE ABRASIÓN POR VÍA HÚMEDA WTAT DE LOS MATERIALES BASE 139
4.5.3	PULIMENTO ACELERADO..... 143
4.6	ENSAYOS COMPLEMENTARIOS 150
4.6.1	ABSORCIÓN DE AGUA 150
4.6.2	COMPARACIÓN VISUAL DEL ENSUCIAMIENTO..... 153
4.6.3	ENSAYO DE ADHERENCIA 157
4.7	RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS IMPLEMENTADOS 160
5 - PRUEBA DE CAMPO	164
5.1	INTRODUCCIÓN 164
5.2	METODOLOGÍA..... 166
5.3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... 172
6 - CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES	189
6.1	ASPECTOS GENERALES 189
6.2	DISCUSIÓN DE ASPECTOS RELEVANTES..... 189
6.3	CONCLUSIONES GENERALES 193
6.3.1	RESPECTO AL OBJETIVO GENERAL..... 193
6.3.2	RESPECTO A LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... 194
6.4	LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN A FUTURO 195
ANEXO A - EQUIPOS IMPLEMENTADOS Y NUEVAS METODOLOGÍAS.....	199
ANEXO B - ESTUDIO DE LA VALORACIÓN DE LA RETRORREFLEXIÓN.....	213
ÍNDICE.....	228
LISTA DE TABLAS.....	230
LISTA DE FIGURAS.....	231

Lista de tablas

Tabla 2-1. Ángulo de los equipos disponibles en el mercado.....	39
Tabla 3-1. Clases de textura	72
Tabla 3-2. Característica del equipo WTT	80
Tabla 4-1. Características técnicas de las microesferas TAF-S2 (H-85 TAF).....	97
Tabla 4-2. Granulometría de las microesferas ECH-20-WBP	98
Tabla 4-3. Características de las microesferas ECH-20-WBP	98
Tabla 4-4. Determinación del contenido de sólidos	102
Tabla 4-5. Valores de Resistencia a la penetración Buchholz.....	104
Tabla 4-6. Resultados de Absorción en muestras sumergidas durante 72 horas	114
Tabla 4-7. Denominación de muestras y materiales utilizados en el ensayo WTT	117
Tabla 4-8. Valores de pérdida de peso de los materiales.....	141
Tabla 4-9. Valores de tensión obtenidos en el Ensayo de Adherencia por tracción	159
Tabla 4-10. Valores de tensión obtenidos en el Ensayo de Adherencia por tracción	160
Tabla 5-1. Condiciones ambientales en el momento de aplicación de las pinturas	180
Tabla 5-2. Resultados del ensayo de Pulimento Acelerado	186
Tabla B-1. Anchos de línea de acuerdo con los requisitos de visibilidad diurna y nocturna	214
Tabla B-2. Descripción de materiales y dosificación de microesferas en las muestras	217
Tabla B-3. Determinación de la pérdida de retrorreflexión en cada tramo	221

Lista de figuras

Figura 1-1. Demarcación horizontal en zona urbana	5
Figura 1-2. Visibilidad diurna y nocturna en rutas	6
Figura 1-3. Campo de ensayo.....	10
Figura 1-4. Simulador de desgaste “Mesa giratoria”	10
Figura 2-1. Fenómeno de secado por coalescencia	21
Figura 2-2. Máquinas de aplicación de Termoplástico por Pulverización	24
Figura 2-3. Máquinas de aplicación de Termoplástico por Extrusión	25
Figura 2-4. Aplicación con máquina a botones de Plástico en Frío.....	26
Figura 2-5. Aplicación Manual de Plástico en Frío.....	26
Figura 2-6. Condiciones de medida del coeficiente de luminancia bajo iluminación difusa	32
Figura 2-7. Ejemplos de Contraste en pavimentos de hormigón	33
Figura 2-8. Fenómeno de retrorreflexión en una microesfera de vidrio.....	34
Figura 2-9. Fenómeno de retrorreflexión y geometría de medida	35
Figura 2-10. Configuración de los ángulos según CIE utilizados en el campo de la reflexión de la luz	36
Figura 2-11. Geometría a 15 metros según CIE	37
Figura 2-12. Geometría a 30 metros según CIE	37
Figura 2-13. Retroreflectómetro portátil	38
Figura 2-14. Retroreflectómetro dinámico	38
Figura 2-15. Péndulo Inglés TRRL del LEMaC.....	42
Figura 2-16. Patrón representativo de marcas recién aplicadas	51
Figura 2-17. Patrón representativo para marcas de más de 300 días.....	52
Figura 2-18. Patrón representativo para marcas con cambios repentinos	52
Figura 3-1. Ejemplo de ensayo de referencia	64
Figura 3-2. Esquema de campo de ensayo con patrón transversal	66
Figura 3-3. Esquema de campo de ensayo con patrón Longitudinal.....	67
Figura 3-4. Esquema del simulador de desgaste.....	71
Figura 3-5. Simulador de Desgaste “Mesa giratoria”	71
Figura 3-6. Aparato de abrasión (“Método de caída de un abrasivo”).....	73
Figura 3-7. Dispositivo Taber Abraser	75
Figura 3-8. Mecanismo de abrasión sobre la muestra.....	75
Figura 3-9. Equipo WTT del LEMaC	80
Figura 3-10. Ensayo de pintura aplicada sobre una placa de mezcla asfáltica	81
Figura 3-11. Equipo WTAT del LEMaC.....	82
Figura 3-12. Equipo de Pulimento Acelerado de Áridos del LEMaC	83
Figura 3-13. Moldes utilizados para el ensayo de Pulimento Acelerado	84
Figura 3-14. Confección de las probetas con sustrato A	85
Figura 3-15. Confección de las muestras con sustrato B	85

Figura 3-16. Confección de las muestras con sustrato C	86
Figura 3-17. Muestras con sustrato A luego del ensayo.....	87
Figura 3-18. Muestras con sustrato B luego del ensayo.....	87
Figura 3-19. Muestras con sustrato C luego del ensayo	88
Figura 4-1. Tamizadora automática del LEMaC	94
Figura 4-2. Microesferas de premezcla P	95
Figura 4-3. Granulometría de las microesferas de premezcla P	95
Figura 4-4. Microesferas de sembrado TAF-S2.....	96
Figura 4-5. Granulometría de las microesferas TAF-S2	96
Figura 4-6. Microesferas de sembrado ECH-20-WBP	97
Figura 4-7. Izq.: Muestra utilizada; Der: Equipo FTIR del CITEMA	99
Figura 4-8. Espectros de las pinturas utilizadas.....	100
Figura 4-9. Espectros de carbonato de calcio.....	101
Figura 4-10. Determinación del material no volátil en masa.....	102
Figura 4-11. Durómetro Buchholz del INIFTA.....	103
Figura 4-12. Preparación de las muestras para ensayos de caracterización	103
Figura 4-13. Diferencia entre color y brillo	104
Figura 4-14. Equipo ByK utilizado del INIFTA.....	106
Figura 4-15. Evaluación visual de la película seca	108
Figura 4-16. Imágenes fotográficas tomadas en un microscopio Olympus del LEMaC	110
Figura 4-17. Fotografías de muestra S1 observadas en el microscopio del LIMF, UNLP.....	110
Figura 4-18. Fotografías de muestra A3 observadas en el microscopio del LIMF, UNLP.....	111
Figura 4-19. Imágenes de la lupa de las muestras de pintura A1, A2, A3 y S1	112
Figura 4-20. Procedimiento para la determinación de la resistencia al ataque químico	113
Figura 4-21. Resultados de pérdida de Dureza Shore A después del ataque químico.....	114
Figura 4-22. Moldeo de placas de Hormigón	115
Figura 4-23. Pintura con dispositivo “plano” para obtener espesor uniforme y sembrado de microesferas con método de tipo “salero”	116
Figura 4-24. Evaluación de la retrorreflexión y luminancia de las probetas con el retroreflectómetro portátil	118
Figura 4-25. Evaluación de la resistencia al deslizamiento con el Péndulo inglés.....	118
Figura 4-26. Cabina de inspección visual para toma de imágenes de las probetas	119
Figura 4-27. Ensayo en equipo WTT de la marca vial.....	119
Figura 4-28. Resistencia al deslizamiento de las probetas según Norma UNE-EN 1436	120
Figura 4-29. Retrorreflexión RL30 de las probetas según Norma UNE-EN 1436	121
Figura 4-30. Luminancia en iluminación difusa según norma UNE-EN 1436.....	122
Figura 4-31. Comportamiento de la pintura base solvente (izq.) y base acuosa (der.) frente al rociado del agua	123
Figura 4-32: Comparación visual posterior a ensayo de la pintura base solvente (izq.) y base acuosa (der.)	123

Figura 4-33. Comparación visual antes y después del ensayo WTT. (A): Imagen tomada con luz natural, con cámara sin flash. Imagen inferior (B): Imagen capturada con flash.....	124
Figura 4-34. Izq.: Imagen tomada de las probetas 5-S y 6-S antes del ensayo. Der.: imágenes posteriores al ensayo WTT de las probetas en la cabina. (A): Imagen tomada con iluminación con lámpara de luz led, con cámara sin flash. (B): Imagen capturada con flash	125
Figura 4-35. Observación en lupa de las 1-S, 5-S y 6-S luego del ensayo WTT	126
Figura 4-36. Comparación visual antes y después del ensayo WTT sobre probetas 3-A y 4-A en la cabina de iluminación realizada con iluminación mediante lámpara led, con cámara sin flash	126
Figura 4-37. Comparación visual antes y después del ensayo WTT sobre probetas 7-S, 8-A, 9-S, 10-A, 11-S, 12-A, 11-S, 12-A con iluminación con lámpara de luz led.....	128
Figura 4-38. Comparación visual antes y después del ensayo WTT sobre probetas 13-S y 14-S. Imagen superior (A): Imagen capturada en cabina con iluminación mediante lámpara led, con cámara sin flash. Imagen inferior (B): Imagen capturada en cabina con cámara con flash sin iluminación artificial	128
Figura 4-39. Equipo Taber Abraser.....	130
Figura 4-40. Variación de la pérdida de peso en el ensayo Taber Abraser	131
Figura 4-41. Preparación de la muestra para el ensayo de abrasión por vía húmeda.....	133
Figura 4-42. Evaluación de la resistencia al deslizamiento para el ensayo WTAT	134
Figura 4-43. Evaluación de los parámetros con un retrorreflectómetro portátil.....	134
Figura 4-44. Lupa binocular Olympus SZ61 del LEMaC	135
Figura 4-45. Ensayo WTAT por vía húmeda.....	135
Figura 4-46. Resultados de RL30, Qd y resistencia al deslizamiento en cada una de las instancias del ensayo WTAT	136
Figura 4-47. Vista en lupa de la probeta ensayada en distintas instancias	137
Figura 4-48. Foto de la probeta en la cabina. A: cabina iluminada sin flash en la cámara. B: cabina sin iluminación con flash activado en la cámara	138
Figura 4-49. Pintado de las Probetas para el ensayo WTAT.....	139
Figura 4-50. Probetas de chapa donde se aplicaron los distintos tipos de pintura	140
Figura 4-51. Pérdida de peso en el ensayo WTAT en distintas condiciones de humedad y temperatura	141
Figura 4-52. Imágenes del aspecto del agua luego del ensayo WTAT	143
Figura 4-53. Sustratos para aplicación de pintura	144
Figura 4-54. Acondicionamiento de las muestras en cámara	144
Figura 4-55. Cabina portátil utilizada para comparación visual	145
Figura 4-56. Rueda de ensayo donde se colocan las probetas.....	145
Figura 4-57. Balanza de precisión para registrar el peso de las probetas	146
Figura 4-58. Variación de la pérdida de peso de pintura luego del ensayo.....	147
Figura 4-59. Variación de la pérdida de peso de pintura luego del ensayo de Pulimento Acelerado con respecto al peso de pintura aplicado en cada muestra	148

Figura 4-60. Muestras ensayadas con falla de adherencia	149
Figura 4-61. Muestras ensayadas por el método de Pulimento Acelerado	150
Figura 4-62. Muestras preparadas para el ensayo de absorción de agua	151
Figura 4-63. Muestras sumergidas en agua	151
Figura 4-64. Ley de variación de absorción en las primeras horas de ensayo	153
Figura 4-65. Toma de imágenes de la muestra para evaluación del ensuciamiento	154
Figura 4-66. Prueba de paso de rueda sobre muestras	154
Figura 4-67. Muestras sobre la que se pasaron las ruedas de una camioneta	155
Figura 4-68. Muestras lavadas luego de haber pasado las ruedas de una camioneta	156
Figura 4-69. Equipo de ensayo de Tensión y Adhesión	157
Figura 4-70. Presentación de las probetas para el ensayo de adherencia	158
Figura 5-1. Esquema de situación existente y planteo de los trabajos.....	165
Figura 5-2. Sector en el cual se realiza la demarcación	166
Figura 5-3. Imagen previa a la aplicación de la pintura	166
Figura 5-4. Esquema general de la demarcación	167
Figura 5-5. Delimitación de las franjas en la senda peatonal	167
Figura 5-6. Equipo utilizado para pulverizar la pintura.....	168
Figura 5-7. Regador de Microesferas.....	168
Figura 5-8. Aplicación de la Pintura S1 sobre la senda peatonal mano a La Plata.....	169
Figura 5-9. Aplicación de la Pintura A3 sobre la senda peatonal mano a Berisso	169
Figura 5-10. Pintura de Franjas sobre dársena de ingreso a la UTN FRLP.....	170
Figura 5-11. Preparación de probetas de Pulimento Acelerado	170
Figura 5-12. Medición de los parámetros de visibilidad con el retrorreflectómetro	171
Figura 5-13. Medición de los parámetros de resistencia al deslizamiento en la dársena	172
Figura 5-14. Denominación de las Franjas en la Avenida 60 mano a La Plata.....	173
Figura 5-15. Senda peatonal momentos previos a la habilitación de las franjas.....	173
Figura 5-16. Marca en el pavimento luego de la habilitación de las franjas	174
Figura 5-17. Marcas en la pintura por el paso de los vehículos	174
Figura 5-18. Izq.: Pintura S1 en pavimento de Hormigón; Der.: Pintura S1 en pavimento asfáltico	175
Figura 5-19. Denominación de las Franjas en la Avenida 60 mano a Berisso	175
Figura 5-20. Secado de capa superficial de la Pintura A3.....	176
Figura 5-21. Huella sobre película húmeda de pintura A3.....	177
Figura 5-22. Pinturas en la dársena de ingreso. Izq.: Pintura S1. Der.: Pintura A3	178
Figura 5-23. Resistencia al deslizamiento de las franjas en la dársena de acceso	178
Figura 5-24. Retrorreflexión con geometría a 30 metros de todas las franjas.....	179
Figura 5-25. Luminancia en iluminación difusa de todas las franjas	179
Figura 5-26. Valores de humedad y temperatura durante el primer período.....	181
Figura 5-27. Precipitación durante el primer periodo luego de la aplicación de la pintura	181
Figura 5-28. Secuencia de fotos en la senda peatonal con pintura S1	183

Figura 5-29. Secuencia de fotos en la senda peatonal con pintura A3	184
Figura 5-30. Secuencia fotográfica de la franja F23 con pintura S1	185
Figura 5-31. Secuencia fotográfica de la franja F26 con pintura A3	185
Figura A-1. Dispositivo de aplicación con manija.....	199
Figura A-2. Dispositivo tipo “salero” para sembrar microesferas	200
Figura A-3. Barra de aplicación.....	201
Figura A-4. Esquema de dispositivo peine.....	202
Figura A-5. Medición de película de pintura húmeda con el peine	202
Figura A-6. Cabina de inspección visual construida para el ensayo WTT	203
Figura A-7. Fotografía de muestra tomada en la Cabina de inspección visual	204
Figura A-8. Cabina portátil utilizada para comparación visual	205
Figura A-9. Condiciones de medida del factor de luminancia β	207
Figura A-10. Condiciones de medida del factor de luminancia en iluminación difusa Qd	207
Figura A-11. Geometría a 30 metros según CIE.....	208
Figura A-12. Geometría según la Norma UNE EN 1436	209
Figura A-13. Esquema de armado de la cámara de inspección simulando condiciones viales.....	210
Figura A-14. Cámara de inspección visual	211
Figura B-1. Pintura de probetas con distintas dosificaciones de microesferas	216
Figura B-2. Retrorreflexión medida en el eje de una Ruta Nacional con equipo dinámico en distintos años.....	218
Figura B-3. Promedio Y acumulado de los datos correspondientes al año 2015.....	219
Figura B-4. Promedio Y acumulado de los datos correspondientes al año 2016.....	219
Figura B-5. Promedio Y acumulado de los datos correspondientes al año 2017	219
Figura B-6. Promedio Y acumulado de los datos correspondientes al año 2018.....	220
Figura B-7. Valores característicos de la Retrorreflexión de los años en estudio obtenida por esta metodología	220
Figura B-8. Pérdida porcentual de Retrorreflexión en el transcurso de los años en estudio ...	222
Figura B-9. Variación de la retrorreflexión en función de la dosificación de microesferas	223
Figura B-10. Variación de la Luminancia en iluminación difusa en función de la dosificación de microesferas	223
Figura B-11. Variación de la Luminancia en iluminación difusa en función de la dosificación de microesferas	224
Figura B-12. Comparación visual en la cabina de las probetas confeccionadas	224
Figura B-13. Comparación visual en la cabina de las probetas confeccionadas	225
Figura B-14. Comparación visual en la cabina de las probetas confeccionadas	225

Nuevas Tecnologías en Recubrimientos Retrorreflectantes para Demarcación Vial

Verónica Vanesa Mechura

La durabilidad de las marcas viales se evalúa mediante pruebas de campo o equipos de gran escala denominados simuladores de desgaste que requieren un tiempo considerable de ensayo para obtener el resultado y son muy costosos.

Por otra parte, la resistencia a la abrasión se evalúa mediante métodos generales utilizados en el ámbito de pinturas. La problemática planteada pone en evidencia la necesidad de un análisis exhaustivo de los materiales para conocer su comportamiento en condiciones de servicio.

Se estudia el desarrollo de procedimientos de ensayo, de costo accesible y sencilla ejecución, basados en la utilización de equipos de uso vial, que sean capaces de predecir en laboratorio el comportamiento de las distintas pinturas cuando se vean sometidas al tránsito.

Finalmente, se implementan tres ensayos viales para simular el desgaste producido en servicio de las pinturas acrílicas de demarcación vial.

Con el ensayo de Pulimento Acelerado se realiza la valoración de los materiales base de demarcación vial y, en los otros ensayos implementados, es posible evaluar la variación de la retrorreflexión y resistencia al deslizamiento de las muestras.