



ING. AUTOMOTRIZ

Trabajo integración Curricular previa a la obtención del título de Ingeniero en Automotriz.

AUTORES:

Bryan Alexander Carvajal Simbaña
Anderson Joshua González Lara

TUTOR:

Ing. Cristopher Fuertes

Análisis comparativo de recubrimiento cerámico SiO₂ en base a la dureza para paneles
automotrices

CERTIFICACIÓN

Nosotros, BRYAN ALEXANDER CARVAJAL SIMBAÑA y ANDERSON JOSHUA GONZÁLEZ LARA declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría, que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

Cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, reglamento y leyes.



BRYAN ALEXANDER
CARVAJAL SIMBAÑA

CI. 1751028745



ANDERSON JOSHUA
GONZÁLEZ LARA

CI. 0932210552

Yo, Ing. Cristopher Fuertes, certifico que conozco a los señores, BRYAN ALEXANDER CARVAJAL SIMBAÑA y ANDERSON JOSHUA GONZÁLEZ LARA, autores exclusivos de la presente investigación, siendo el responsable exclusivo tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Cristopher Fuertes". The signature is stylized with a large initial 'C' and a long, sweeping flourish extending to the right.

CI. 1721027769

APROBACIÓN DEL TUTOR

Yo Christopher Fuertes certifico que conozco a los autores del presente trabajo siendo la responsable exclusiva tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.

A handwritten signature in blue ink, reading "CHRISTOPHER FUERTES". The signature is stylized with a large, sweeping initial "C" and a long, flowing tail.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Dedicatoria

Dedico este logro, en primer lugar, a Dios, por ser mi guía, mi fortaleza y la luz que ilumina cada paso de mi camino. A mis amados padres, Manuel y Alexandra, pilares fundamentales de mi vida.

A ti, Manuel, por ser un ejemplo de superación, perseverancia y dedicación; por tus sabios consejos y correcciones que me impulsan a ser mejor cada día.

A ti, Alexandra, por ser la madre más virtuosa y comprensiva, por tu paciencia infinita y por ese amor que me sostiene incluso en los momentos más difíciles.

A mis docentes, quienes con su esfuerzo y entrega han contribuido a mi crecimiento personal y profesional.

Y finalmente, a todas las personas que, de una u otra forma, aportaron su granito de arena en la construcción de lo que hoy soy.

.

Anderson Joshua González Lara

Agradecimiento

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento, en primer lugar, a Dios, por ser la guía y fortaleza en cada paso de mi vida. A mis queridos padres, Manuel y Alexandra, por su amor incondicional y por ser el pilar fundamental de mi formación.

A ti, Manuel, gracias por ser un ejemplo de superación, perseverancia y sabiduría; por tus consejos y amonestaciones que, aunque a veces duras, siempre han buscado hacer de mí una mejor persona.

A ti, Alexandra, por ser la madre más virtuosa que alguien podría desear, por tu paciencia infinita, tu comprensión y ese amor que me acompaña cada día.

Extiendo también mi gratitud a mis docentes, quienes con su dedicación y conocimiento han dejado una huella profunda en mi crecimiento académico y personal.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de manera directa o indirecta, han aportado su granito de arena en la construcción de la persona que soy hoy.

Anderson Joshua González Lara

Dedicatoria

Dedico este logro a mis padres Rocío Simbaña, Carlos Carvajal, pilares fundamentales en mi vida, quienes con esfuerzo, amor y apoyo incondicional hicieron posible que culmine mi carrera.

A mis abuelitos Nelson Simbaña, Flora Gualoto que desde el cielo me cuidaron para que culmine esta etapa fundamental en mi vida

A ti abuelita Hilda Mayanza por cuidarme desde pequeño e inculcarme buenos valores, y que nunca me dejastes solo en momentos difíciles.

A mi madre Rocío, por ser mi guía, mi ejemplo y mi mayor motivación. Gracias por brindarme todo ese amor incondicional, por enseñarme que no hay meta imposible cuando se lucha con el corazón, este logro también es tuyo como mío.

Bryan Alexander Carvajal Simbaña

Agradecimiento

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a mi madre, por ser mi guía y mi mayor fuente de inspiración. Gracias por tu amor incondicional, por darme valores desde pequeño, por ser esa mujer que admiro mucho, por tu paciencia infinita y por enseñarme el valor del esfuerzo. a mi padre, por su esfuerzo, sus consejos y por impulsarme siempre a dar lo mejor de mí.

A mis abuelos, por su cariño sus enseñanzas y por ser ejemplo de sabiduría y fortaleza, este logro es el reflejo de todo lo que aprendí de ustedes, los amaré siempre.

A mis docentes de la facultad de ingeniería automotriz, por compartir sus conocimientos, experiencias y valores profesionales. Muchas gracias por su dedicación, paciencia y compromiso en mi formación, y sobre todo a amar esta profesión.

Bryan Alexander Carvajal Simbaña

Tabla de contenido

Índice de Figuras	12
Índice de tablas.....	12
Índice de Anexos.....	13
Resumen	14
Abstract.....	16
Introducción	18
MARCO TEÓRICO	21
Propiedades de la Pintura Automotriz Sistema de Capas	21
Propiedades de la Pintura Automotriz	22
Sistema de Capas del Recubrimiento Automotriz.....	22
Diferencias entre Piezas Nuevas y Repintadas.....	23
Propiedades Químicas y Físicas de los Recubrimientos Cerámicos.....	24
Clasificación de Tratamientos Cerámicos.....	25
Aplicación de Recubrimientos Cerámicos en Vehículos	25
Métodos y Materiales.....	26
Materiales.....	32
Elementos	32

ASTM D3363-22 - Ensayo de Dureza con Lápiz Probetas de Ensayo (probetas de 20 x10 cm)	32
.....	
Equipos y Herramientas.....	32
Materiales auxiliares:	33
ASTM D3359-17 - Ensayo de Adherencia Probetas de Ensayo	33
Equipos y Herramientas.....	33
ISO 19403-5 - Evaluación de Hidrofobicidad Muestras Evaluadas	34
Equipos y Materiales	34
Materiales de ensayo	35
Instrumentos Auxiliares	36
ASTM D523-18 - Ensayo de Brillo Superficial Probetas de Ensayo	36
Equipos Principales	37
Procedimientos Experimentales.....	38
Procedimiento ASTM D3363-22 - Ensayo de Dureza con Lápiz	38
Procedimiento ASTM D3359-17 - Ensayo de Adherencia.....	38
Procedimiento ISO 19403-5 - Evaluación de Hidrofobicidad	39
Procedimiento ASTM G85-09 - Ensayo de Niebla Salina	39
Procedimiento ASTM D523-18 - Ensayo de Brillo Superficial.....	39
RESULTADOS	40
CONCLUSIONES	50

Bibliografia54

ANEXOS57

Índice de Figuras

Figura 1	Clasificación de resultados de ensayo de adhesión.....	28
-----------------	--	----

Índice de tablas

Tabla 1	Resultados de Dureza Superficial por Probeta (ASTM D3363-22)	40
Tabla 2	Resultados de Adherencia con Clasificación ASTM D3359	43
Tabla 3	Resultados Comparativos de Hidrofobicidad (ISO 19403-5).....	45
Tabla 4	Variación de Peso en Ensayo de Niebla Salina (ASTM G85-09).....	46
Tabla 5	Resultados de Brillo Superficial a Múltiples Ángulos (ASTM D523-18).....	48
Tabla 6	Resumen de todas las pruebas	49

Índice de Anexos

Anexo 1	Característica de la probeta	57
Anexo 2	Peso de la probeta	57
Anexo 3	Materiales utilizados para el ensayo de lápiz	58
Anexo 4	Lapices utilizados en el ensayo	58
Anexo 5	Observación de los resultados mediante microscopio	59
Anexo 6	Materiales utilizados para la prueba de adherencia	59
Anexo 7	Observación de los surcos de la prueba de adherencia	60
Anexo 8	Maquina que realizo el ensayo de niebla salina	60
Anexo 9	Visualización de las probetas dentro de la cámara salina	61

Análisis comparativo de recubrimiento cerámico SiO₂ en base a la dureza para paneles automotrices.

Ing. Cristopher Israel Fuertes Iturralde,

crifuertesit@uide.edu.ec

Bryan Alexander Carvajal Simbaña brcarvajalsi@uide.edu.ec

Anderson Joshua González Lara andgonzalezla@uide.edu.ec

Resumen

Introducción: El objetivo de la presente investigación es evaluar la resistencia de recubrimientos cerámicos con la dureza de: 9H, 10H y 14H aplicados sobre paneles automotrices. Para lo cual se emplean probetas sometidas a distintos ensayos para determinar el nivel de dureza que influye en la protección del sustrato metálico, la conservación estética la resistencia a rayaduras la conservación estética provocadas por agentes externos. **Metodología:** las pruebas realizadas de los recubrimientos cerámicos 9H, 10H y 14H se desarrolló mediante un enfoque experimental y comparativo, ejecutando los ensayos experimentales de las normas ASTM D3363, ASTM D3359, ASTM G85-09, ISO 19403-5 y ASTM D523-08. **Resultados:** Los ensayos realizados revelaron comportamientos diferenciados según el nivel de dureza de cada recubrimiento cerámico evaluado. En el ensayo de dureza superficial según norma ASTM D3363-22, el recubrimiento 9H mostró una dureza real inferior a B con inicio de daño desde el lápiz más suave y desprendimiento considerable con lápiz F-H, mientras que el 10H alcanzó dureza entre B-HB presentando desprendimiento mínimo con B, moderado con HB y considerable con 2H. El recubrimiento 14H demostró el mejor desempeño con dureza real de 3H, resistiendo sin daño visible hasta el lápiz 2H y mostrando desprendimiento mínimo únicamente con 3H. En adherencia según norma ASTM D3359, el 9H obtuvo clasificación promedio de 2.7B con área desprendida del 15-35%, el 10H alcanzó 4.3B con menos del 5% de pérdida en el 67% de las probetas, y el 14H logró clasificación máxima de 5B con 0% de desprendimiento en el 100% de las muestras. Las propiedades hidrofóbicas evaluadas mediante norma ISO 19403-5 revelaron que el 10H presentó el mejor desempeño con ángulo de contacto de 120-130° y tiempo de deslizamiento de 1.8 ± 0.3 segundos sin dejar rastro, clasificándose como superhidrofóbico. El 14H registró ángulo de 105-115°

con tiempo de 3.5 ± 0.4 segundos y rastro leve de 0.5-1 mm, mientras el 9H alcanzó $100-110^\circ$ con 4.2 ± 0.5 segundos dejando rastro visible de 1-2 mm. En resistencia a corrosión según ASTM G85-09, tras 200 horas de exposición el recubrimiento 14H mostró variaciones controladas entre +4 y +6 gramos manteniendo integridad superficial, el 10H presentó variaciones de -1 a +7 gramos en el 83% de probetas, mientras el 9H evidenció pérdidas críticas hasta -67 gramos representando degradación severa del sustrato. El análisis de brillo superficial según ASTM D523-18 mostró a 20° valores de 76.66, 78.24 y 81.06 unidades de brillo respectivamente, confirmando que el 14H presenta la superficie más lisa y uniforme. **Conclusión:** Los resultados obtenidos en el presente estudio evidencian que la dureza del recubrimiento cerámico constituye un factor determinante en el desempeño final sobre paneles automotrices, tanto en protección del sustrato metálico como en mantenimiento estético. En términos comparativos, el recubrimiento de 14H mostró el comportamiento más eficiente en la mayoría de los ensayos realizados, destacándose con mayor dureza superficial real (3H), óptima adherencia (5B), adecuada resistencia a la corrosión y estabilidad en el brillo, lo que sugiere una estructura de película más compacta, estable y resistente frente a agentes abrasivos y químicos.

Abstract

Introduction: The objective of this research is to evaluate the resistance of ceramic coatings with hardness levels of 9H, 10H, and 14H applied to automotive panels. For this purpose, test specimens were subjected to different tests to determine the hardness level that influences the protection of the metallic substrate, aesthetic preservation, scratch resistance, and the maintenance of surface appearance against external agents.

Methodology: The tests performed on the 9H, 10H, and 14H ceramic coatings were developed using an experimental and comparative approach. The experimental tests were carried out in accordance with ASTM D3363, ASTM D3359, ASTM G85-09, ISO 19403-5, and ASTM

D523-08 standards. **Results:** The tests revealed differentiated behaviors depending on the hardness level of each ceramic coating evaluated. In the surface hardness test according to ASTM D3363-22, the 9H coating showed an actual hardness lower than B, with damage initiation from the softest pencil and considerable coating removal with F–H pencils. The 10H coating achieved hardness between B and HB, showing minimal removal with B, moderate removal with HB, and considerable removal with 2H. The 14H coating demonstrated the best performance, with an actual hardness of 3H, resisting without visible damage up to the 2H pencil and showing minimal removal only with 3H. In the adhesion test according to ASTM D3359, the 9H coating obtained an average classification of 2.7B, with a detached area between 15% and 35%. The 10H coating reached a classification of 4.3B, with less than 5% loss in 67% of the specimens, while the 14H coating achieved the maximum classification of 5B, with 0% detachment in 100% of the samples. The hydrophobic properties evaluated under ISO 19403-5 showed that the 10H coating presented the best performance, with a contact angle of 120–130° and a sliding time of 1.8 ± 0.3 seconds without leaving a trace, classifying it as superhydrophobic. The 14H coating recorded a contact angle of 105–115° with a sliding time of 3.5 ± 0.4 seconds and a slight trace of 0.5–1 mm, while the 9H coating reached a contact angle of 100–110° with a sliding time of 4.2 ± 0.5 seconds, leaving a visible trace of 1–2 mm. In the corrosion resistance test according to ASTM G85-09, after 200 hours of exposure, the 14H coating showed controlled weight variations between +4 and +6 grams while maintaining surface integrity. The 10H coating presented variations between -1 and +7 grams in 83% of the specimens, whereas the 9H coating exhibited critical losses of up to -67 grams, indicating severe substrate degradation.

The surface gloss analysis according to ASTM D523-18 showed gloss values at 20° of 76.66,

78.24, and 81.06 gloss units, respectively, confirming that the 14H coating presents the smoothest and most uniform surface. Conclusion: The results obtained in the present study demonstrate that the hardness of the ceramic coating is a determining factor in the final performance over automotive panels, both in the protection of the metallic substrate and in the preservation of aesthetics. In comparative terms, the 14H coating showed the most efficient behavior in most of the tests performed, standing out due to its higher actual surface hardness (3H), optimal adhesion (5B), suitable corrosion resistance, and gloss stability, suggesting a more compact, stable, and resistant film structure against abrasive and chemical agents.

Introducción

La presente investigación sobre recubrimientos cerámicos automotrices de diferentes niveles de dureza (9H, 10H y 14H) se fundamenta en la necesidad crítica de proteger los acabados vehiculares en el contexto climático específico de Ecuador, donde las condiciones tropicales y ecuatoriales representan desafíos particulares para la preservación de las superficies pintadas. La radiación ultravioleta constituye uno de los principales agentes de degradación en climas tropicales, donde la intensidad solar es significativamente superior debido a la ubicación geográfica ecuatorial. Según Cowlshaw (2021), la luz ultravioleta que el sol emite degrada la pintura mediante un proceso denominado foto degradación, donde "el polímero absorbe radiación ultravioleta" y "este exceso de energía debe ser eliminado" principalmente "rompiendo la estructura primaria enlazada del polímero".

Esta protección se logra mediante la composición química específica de los recubrimientos cerámicos, que según el análisis de la Breaking AC (2025), están "compuestos principalmente de polímeros líquidos infundidos con compuestos inorgánicos como dióxido de silicio (SiO_2), dióxido de titanio (TiO_2)" que proporcionan "dureza, durabilidad y resistencia a factores de estrés ambiental" (párr. 2). La relevancia de esta protección en climas extremos se evidencia particularmente en estudios donde "la degradación UV/IR de los materiales de los vehículos ocurre mucho más rápido" en condiciones de alta radiación solar (Car Clean Hawaii, s.f., párr. 3). La alta humedad característica del clima ecuatorial representa otro factor crítico que justifica esta investigación. Según un estudio citado por Lakeland Ceramic Coating (2025).

los vehículos expuestos a ambientes de alta humedad pueden experimentar hasta un 25% de reducción en la fuerza de adherencia de la pintura" comparado con climas más secos (Smith et al., 2020, citado en párr. 4). La investigación de Bauer et al. (2000) en ScienceDirect demostró que muestras de recubrimientos fueron expuestas durante 12 meses en "Daytona (USA), un ambiente tropical húmedo" junto con otras ubicaciones, evidenciando que las condiciones climáticas específicas afectan significativamente el desempeño de los recubrimientos (párr. 1). Johnson (2021, citado en Lakeland Ceramic Coating, 2025) enfatiza que "incluso un período corto de alta humedad relativa puede iniciar una cascada de procesos de degradación superficial" . Los estudios publicados por la American Coatings Association (2020) confirman que "la

exposición a radiación solar, fluctuaciones de temperatura, lluvia, nieve y caída ambiental (lluvia ácida), desafían el desempeño de la mayoría de los recubrimientos" especialmente en objetos que "residen predominantemente al aire libre" como automóviles (párr. 2).

En cuanto a la protección del barniz original, los recubrimientos cerámicos actúan como una barrera protectora que extiende significativamente la vida útil de las superficies pintadas. Según Bui et al. (2024).

En su investigación publicada en MDPI, "numerosos estudios han destacado la versatilidad de los recubrimientos cerámicos en aplicaciones industriales" demostrando "su superior resistencia al desgaste, corrosión y térmica" (Köse et al., 2016, citado en párr. 8). La protección durante procesos de mantenimiento es especialmente relevante, ya que según Car Clean Hawaii (s.f.), "los inhibidores UV de Benzotriazol tienden a flotar o migrar a la superficie del material mientras se está curando, por lo que los 7-15 micrones superiores de la pintura tienen más protección UV" y "una vez que esa capa superior de pintura es pulida, el material comenzará a desvanecerse exponencialmente más rápido" (párr. 10).

La frecuencia de lavados necesarios en climas tropicales húmedos representa un desafío adicional que justifica el uso de recubrimientos hidrofóbicos. Garvin Auto (2025) reporta que estudios indican "una reducción en la acumulación de suciedad de hasta un 90% comparado con vehículos no tratados" y que "aquellos que aplican recubrimientos hidrofóbicos experimentan hasta un 50% de reducción en la frecuencia de lavado" (párr. 6-7). La composición química que genera estas propiedades es explicada por Breaking AC (2025), señalando que "la hidrofobicidad se logra mediante la alineación de grupos metilo y la formación de enlaces -Si-O-Si- durante el curado" resultando en que "las gotas de agua se forman en perlas y ruedan fuera de la superficie" (párr. 9).

Esta investigación confirma que los recubrimientos cerámicos "proporcionan dureza superior, hidrofobicidad y resistencia a rayones, corrosión y degradación ultravioleta (UV)" (párr. 17).

La lluvia ácida constituye otro factor ambiental de particular relevancia. Hernández-Peña et al. (2023) en ScienceDirect establecen que "la exposición a intemperismo acelerado disminuye la durabilidad" de los sistemas de recubrimiento automotriz mediante "exposición a altas

temperaturas, radiación UV y agua de lluvia" (párr. 1). The Auto Paint Depot (2024) advierte que "la lluvia ácida, nieve e incluso alta humedad pueden afectar la pintura automotriz causando corrosión y ampollas en la pintura" donde "los minerales y contaminantes en el agua pueden grabar el acabado" (párr. 3). La investigación de Bauer et al. (2000) específicamente estudió "los efectos de la lluvia ácida en la apariencia de sistemas de pintura automotriz" mediante exposición en "ambientes naturales severos" (título del artículo). Los estudios de intemperismo natural realizados por Zhang et al. (citado en ResearchGate, 2000) en sitios con "clima típico caliente-húmedo" como Qionghai y Chennai demostraron que "el grado de degradación en estos sitios es mayor que en otros sitios" resultando en "deterioro de las propiedades ópticas y daño serio de la superficie de la muestra" (párr. 1).

Desde el punto de vista de la eficiencia térmica, la investigación de Bestclearbra (2025) indica que "el dióxido de titanio es el ingrediente clave para la protección UV" debido a "su capacidad de absorber y disipar los rayos UV dañinos" (párr. 12). La American Coatings Association (2020) establece que "la degradación por radiación UV típicamente se denomina fotooxidación, ya que la radiación UV inicia la reacción, pero el oxígeno atmosférico participa en las vías de degradación química" (párr. 8). Los estudios sobre homogeneidad de sistemas de pintura automotriz publicados por ScienceDirect (2025) confirmaron que "la exposición a radiación UV, temperatura y humedad" son todos "factores en la degradación de pinturas automotrices" donde "la exposición a radiación UV puede causar desvanecimiento de la pintura y reducción en el brillo" (párr. 1). La investigación de LeJeune Ceramic Coating (2025) sobre durabilidad de películas de protección en diferentes climas establece que "los recubrimientos cerámicos de alta calidad incluyen inhibidores UV que ralentizan esta degradación" (párr. 3).

La evaluación sistemática de estos recubrimientos mediante normas estandarizadas internacionales permitirá establecer criterios técnicos fundamentados para la selección y aplicación de sistemas de protección automotriz en Ecuador, contribuyendo al conocimiento científico sobre el comportamiento de estos materiales en condiciones climáticas ecuatoriales y proporcionando recomendaciones prácticas para la industria automotriz local.

MARCO TEÓRICO

Propiedades de la Pintura Automotriz Sistema de Capas

El sistema de pintura automotriz moderno está compuesto por múltiples capas especializadas que trabajan en conjunto para proporcionar protección y estética al vehículo. Según Painted Autobody Parts (2024), "el espesor típico de pintura, incluyendo primer, capa base y capa transparente, ahora varía de 110 a 125 micrones". Esta reducción en comparación con sistemas anteriores no significa resistencia comprometida; en su lugar, las capas más delgadas son más eficientes y ambientalmente amigables. Wontor (2024).

El primer constituye la primera capa aplicada al sustrato metálico y cumple funciones críticas de adherencia y protección contra la corrosión. Según OCD Car Care (2024), "el primer generalmente mide entre 20-30 micrones de espesor" y "algunos fabricantes de pintura incluyen aditivos al primer que ayudan a resistir el astillamiento por piedras" (párr. 7). Ultimate Finish Detailing (2024) especifica que "el espesor del primer en autos modernos, aunque varía según la marca del auto y los procesos de operación de planta individuales, usualmente está entre 8 micrones (μm) y 38 micrones (μm)" (párr. 5). La investigación de Hernández-Peña et al. (2023) en ScienceDirect establece que los sistemas de pintura automotriz OEM "están generalmente compuestos de cuatro capas para partes metálicas: primer (e-coat), primer surfacer, capa base y capa transparente" (párr. 1).

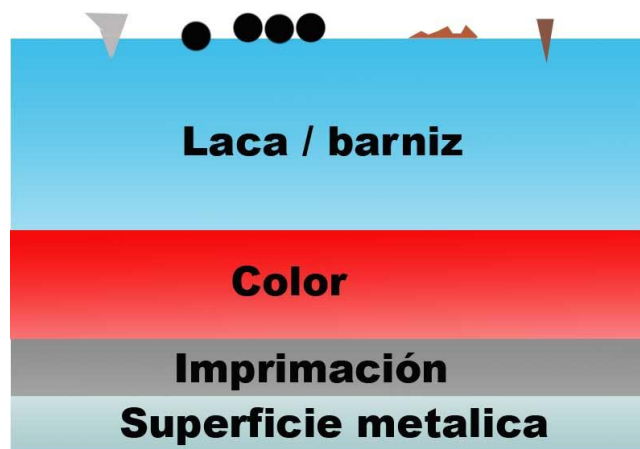
Capa Base (Basecoat): La capa base proporciona el color distintivo del vehículo. Según SYBON Professional Car Paint (2024), "el espesor de la capa de capa base típicamente varía de 15 a 25 micrones" (párr. 3). CarExamer (2024) confirma que "el espesor de la capa base varía de 13 micrones (μm) a 38 micrones (μm)" (párr. 2). ResearchGate (2024) especifica que en automóviles modernos, "la pintura automotriz que forma la capa base tiene poca resistencia a la abrasión, de ahí los acabados libres de rayones proporcionados por la capa transparente" (párr. 2).

Capa Transparente (Clearcoat): La capa transparente es el componente crítico para la protección superficial. Ultimate Finish Detailing (2024) establece que "la capa transparente (laca), que proporciona brillo y protección, usualmente mide entre 30 y 50 μm " (párr. 7).

SYBON Professional Car Paint (2024) confirma que "la capa transparente, crucial para la durabilidad automotriz, es la parte más gruesa, variando de 40 a 50 micrones" y "protege contra rayos UV y daño ambiental" (párr. 4). ResearchGate (2024) detalla que "en autos modernos, la resistencia de la pintura es proporcionada por la capa transparente externa (40- 50 μm) cubriendo la capa base coloreada (15-20 μm)" (párr. 1).

Figura 1

Capas del panel automotriz



Fuente. Palacios P. Manual de detailing (2012)

Propiedades de la Pintura Automotriz

Sistema de Capas del Recubrimiento Automotriz

El sistema de pintura automotriz moderno está compuesto por múltiples capas especializadas que proporcionan protección y estética al vehículo. Según Hernández-Peña et al. (2023), "los sistemas de pintura automotriz OEM están generalmente compuestos de cuatro capas para partes metálicas: primer (e-coat), primer surfacer, capa base y capa transparente" (p. 2). Este sistema multicapa ha evolucionado significativamente desde la introducción del sistema basecoat/clearcoat a mediados de la década de 1980, como documenta Seubert et al. (2016), quienes señalan que "un nuevo tipo de acabado húmedo sobre húmedo fue desarrollado e introducido a finales de los años 1970, consistente en una capa base delgada y una capa

transparente más gruesa" (p. 4).

Capa de Imprimación (Primer): La primera capa aplicada al sustrato metálico cumple funciones críticas de adherencia y protección contra la corrosión. Según el estudio de Seubert et al. (2016), "el espesor de la capa interior está cerca de 20 μm " mientras que "la pintura de imprimación del exterior por robot forma una película de 25-40 μm de espesor" (p. 12). Hernández-Peña et al. (2023) especifican que "la capa de imprimación con un espesor de 20 a 30 μm ofrece protección contra corrosión, alisado, astillamiento y resistencia UV" (p. 2). La investigación de Zieba-Palus et al. (2020) confirma que "un sistema de pintura de fábrica original para autos tiene una secuencia típica de capas: sustrato, primer, surfacer, capa superior" (p. 3).

Capa Base (Basecoat): Esta capa proporciona el color distintivo del vehículo y posee características específicas de formulación. Como establecen Seubert et al. (2016), "la capa base contiene el pigmento colorante principal" (p. 13). El estudio de Sun et al. (2018) sobre resistencia al rayado en recubrimientos automotrices especifica que "la capa base trae color y efectos visuales con un espesor de película de 10 μm -20 μm " (p. 2). Esta capa tiene limitada resistencia mecánica por sí sola, como confirma el estudio de Seubert et al. (2016), señalando que requiere la protección adicional de la capa transparente para proporcionar durabilidad adecuada.

Capa Transparente (Clearcoat): La capa transparente es el componente crítico para la protección superficial y la estética final. Sun et al. (2018) establecen que "la capa transparente es la capa más superior" y está "diseñada para proporcionar una apariencia brillante y proteger contra una amplia gama de tensiones ambientales, así como daños mecánicos por astillas de piedra, rayones, marcas, etc." (p. 2). Hernández-Peña et al. (2023) especifican que el espesor de la capa transparente puede alcanzar "hasta 20-50 μm " (p. 2). La importancia crítica de esta capa se evidencia en el estudio de Seubert et al. (2016), quienes señalan que "la capa transparente proporciona un recubrimiento protector contra efectos ambientales, corrosión y degradación por luz UV" (p. 13).

Diferencias entre Piezas Nuevas y Repintadas

La investigación forense de ScienceDirect (2025) distingue claramente entre sistemas OEM y reparaciones: "las reparaciones OEM usualmente toman la forma de capas adicionales de capa transparente y capa base sobre el sistema de capas OEM típico" mientras que "los repintados aftermarket son aquellos realizados después de que el vehículo ha salido de la fábrica, usualmente después de un accidente" (párr. 6-7). El estudio identifica tres tipos de repintados

aftermarket: el primer tipo corresponde a "capas adicionales de capa base y capa transparente" que pueden confundirse con reparaciones OEM; el segundo tipo involucra "capas adicionales de primer surfacer, capa base y capa transparente" identificables por la presencia de una capa de primer surfacer encima de una capa transparente; y el tercer tipo corresponde a "una nueva secuencia de capas de pintura" completamente distinguible del sistema OEM del vehículo (párr. 7).

Propiedades Químicas y Físicas de los Recubrimientos Cerámicos

Los recubrimientos cerámicos automotrices modernos se basan en compuestos inorgánicos avanzados que proporcionan protección superior. Según Bui et al. (2024), "numerosos estudios han destacado la versatilidad de los recubrimientos cerámicos en aplicaciones industriales, demostrando su superior resistencia al desgaste, corrosión y térmica" (p. 8). La composición química fundamental de estos recubrimientos se describe en el estudio de Ruiz- Cornejo et al. (2020), quienes establecen que "los compuestos como óxidos metálicos, cerámicas o compuestos orgánicos ofrecen diferentes propiedades, como actividad fotocatalítica" y destacan que "entre estos compuestos, el TiO₂ es uno de los materiales con resultados prometedores" (p. 3).

Dióxido de Silicio (SiO₂): El componente principal de hidrofobicidad. La investigación de Silva-Treviño et al. (2022) sobre agentes hidrofóbicos establece que "los grupos hidroxilo del PDMS, que se hidroliza durante la agitación, pueden interactuar con las antipartículas de SiO₂ mediante enlaces de hidrógeno" (p. 3). El estudio de Wang et al. (2024) sobre propiedades superhidrofóbicas confirma que "el nano-SiO₂ produjo suficiente rugosidad, lo que hizo que el recubrimiento fuera superhidrofóbico con un ángulo de contacto de más de 152°" (p. 15).

Dióxido de Titanio (TiO₂): El componente que proporciona dureza y resistencia mecánica. Wang et al. (2024) documentan que "las partículas de TiO₂ como cerámicas reforzantes típicas pueden mejorar significativamente la resistencia mecánica y la resistencia a la intemperie del recubrimiento" (p. 3). La investigación de Zhang et al. (2024) sobre estabilidad mecánica establece que "el recubrimiento con TiO₂: EP de 1:3 mostró el mejor rendimiento superhidrofóbico" con "un ángulo de contacto de 159.5° ± 1" (p. 8).

Polímeros de Silicona (PDMS): El agente aglutinante y modificador hidrofóbico. Según

Kapridaki et al. (2012), "el polydimethylsiloxano (PDMS) ofrece excelente adherencia, hidrofobicidad y estabilidad después del entrecruzamiento y curado" y "se usa como capa de unión para mejorar la adherencia entre el recubrimiento y el sustrato, así como para reducir la energía superficial general" (p. 4). Silva-Treviño et al. (2022) confirman que "el PDMS es más frecuentemente utilizado" como agente hidrofóbico y que "tiene terminaciones metilo, haciéndolo hidrofóbico" (p. 5).

Clasificación de Tratamientos Cerámicos

Aunque no existe una clasificación estandarizada internacional única, los recubrimientos cerámicos automotrices se pueden categorizar según su composición y nivel de desempeño. Bui et al. (2024) establecen una clasificación funcional: "los recubrimientos cerámicos proporcionan dureza superior, hidrofobicidad y resistencia a rayones, corrosión y degradación ultravioleta (UV), aunque con costos más altos y procedimientos de aplicación complejos" (p. 17).

Clasificación por dureza: La nomenclatura comercial utiliza la escala de dureza de lápices (9H, 10H, 14H), aunque como se evidenció en los ensayos realizados, existe una discrepancia significativa entre la denominación comercial y la dureza real medida según normas estandarizadas como ASTM D3363-22.

Clasificación por composición: Según Ruiz-Cornejo et al. (2020), los recubrimientos pueden clasificarse en base a SiO₂ puro, base a TiO₂ puro, o composites SiO₂-TiO₂, donde "el compuesto SiO₂-TiO₂ se obtiene principalmente por síntesis química" mediante "reacciones sol-gel" (p. 5).

Aplicación de Recubrimientos Cerámicos en Vehículos

El proceso de aplicación de recubrimientos cerámicos en vehículos requiere preparación superficial meticulosa y condiciones controladas. Kapridaki et al. (2012) describen que "el recubrimiento transparente-hidrofóbico híbrido semi-cristalino SiO₂-TiO₂" se deriva de "una mezcla de tetraetoxisilano (TEOS) y titanio-tetra-isopropóxido (TTIP) incorporando un organosilano, el polydimethylsiloxano terminado en hidroxilo (PDMS)" (p. 2). Wang et al.

(2024) especifican que para aplicaciones automotrices, "el nano-SiO₂ y TiO₂ fueron utilizados para modificar dodecyltrimethoxysilane (DTMS), un recubrimiento impermeable comúnmente usado para protección" (p. 2).

El método de aplicación más común es mediante spray o pulverización. La investigación de Ramezani et al. (2016) sobre métodos comparativos establece que "los recubrimientos por spray fueron capaces de regenerar superhidrofobicidad y mantener propiedades autolimpiantes mientras eran estables en ambiente exterior" (p. 1). Liu et al. (2023) confirman que para superficies de concreto arquitectónico ultra-alto desempeño, "un recubrimiento fotocatalítico superhidrofóbico autolimpiante con estructura de doble capa fue preparado exitosamente sobre la superficie mediante un simple método de pulverización en dos pasos" (p. 1).

Métodos y Materiales

ASTM D3363-22 - Standard Test Method for Film Hardness by Pencil Test.

Tipo de metodología: Esta normativa utiliza una metodología cuantitativa y cualitativa mixta. Es cuantitativa porque asigna valores numéricos discretos en una escala ordinal de dureza (6B a 9H), y es cualitativa porque requiere evaluación visual del daño y clasificación según categorías descriptivas (corte, rayado, marca de lápiz).

Variables evaluadas:

Variable dependiente principal: Dureza superficial del recubrimiento expresada en la escala de lápices

Variables independientes: Tipo de lápiz utilizado, ángulo de aplicación (45°), presión aplicada, longitud del trazo

Variables de control: Preparación del lápiz (afilado y aplanado), temperatura (23±2°C), humedad relativa (50±5%), sustrato (debe ser duro y rígido)

Descripción metodológica: Según ASTM International (2022), "este método de ensayo cubre un procedimiento para determinación rápida y económica de la dureza de película de un recubrimiento orgánico sobre un sustrato metálico o similarmente duro en términos de minas de dibujo o minas de lápiz de dureza conocida" (Sección 1.1). El método se basa en el principio de que lápices de diferente dureza producen diferentes tipos de daño en la superficie del recubrimiento. Como establece la norma, "las mediciones de dureza con lápiz han sido utilizadas

por la industria de recubrimientos durante muchos años para determinar la dureza de películas de recubrimiento orgánico transparentes y pigmentadas" y "este método de ensayo también ha sido usado para determinar el curado de estos recubrimientos, especialmente cuando se usa secado forzado con calor" (Sección 5.1).

El procedimiento requiere sostener el lápiz firmemente contra la película a un ángulo de 45° con la punta alejada del operador y empujarlo sobre la superficie por un recorrido mínimo de 6.5 mm. La norma define dos parámetros críticos: "dureza de corte (gouge hardness)" como "el lápiz más duro que dejará la película sin cortar por una longitud de trazo de al menos 3 mm", y "dureza de rayado (scratch hardness)" como "el lápiz más duro que no romperá ni rayará la película superficialmente" (Sección 3). La norma reconoce limitaciones importantes, estableciendo que "los resultados obtenidos pueden variar entre diferentes laboratorios cuando se utilizan lápices de diferentes fabricantes, así como cuando se utilizan diferentes sustratos" y que "para mejorar la reproducibilidad de resultados de ensayo para un grupo específico de pruebas, se recomienda utilizar minas de dibujo o lápices hechos por el mismo fabricante y del mismo lote" (Sección 5.2).

ASTM D3359-17 - Standard Test Methods for Rating Adhesión by Tape Test

Tipo de metodología: Esta normativa emplea una metodología cualitativa semicuantitativa. Es cualitativa porque se basa en evaluación visual del área desprendida y comparación con patrones de referencia fotográficos, pero también es semicuantitativa porque asigna valores numéricos (0B a 5B) basados en porcentajes específicos de área afectada.

VARIABLES EVALUADAS:

Variable dependiente principal: Adhesión del recubrimiento al sustrato expresada en escala 0B-5B

VARIABLES INDEPENDIENTES: Tipo de corte (X-cut o lattice), espaciamiento entre cortes, tipo de cinta adhesiva, tiempo de contacto de la cinta (90 ± 30 segundos), ángulo de remoción (180°)

VARIABLES DE CONTROL: Espesor del recubrimiento (método apropiado solo para espesores $< 125 \mu\text{m}$), preparación de la superficie, condiciones ambientales



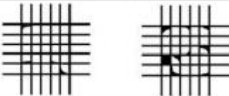

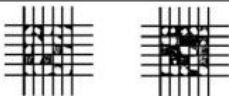

Descripción metodológica: La norma ASTM D3359-17 establece dos métodos distintos: el Método A (X-cut) para recubrimientos de espesor conocido o esperado mayor a $50 \mu\text{m}$, y el

Método B (lattice cut) para recubrimientos con espesor menor a 50 μm o espesor desconocido. Como describe la norma en su alcance, este método de ensayo "describe procedimientos para evaluar la adhesión de películas de recubrimiento a sustratos metálicos mediante la aplicación y remoción de cinta sensible a la presión sobre cortes hechos en la película".

El Método B (lattice cut), utilizado en esta investigación, requiere realizar "11 cortes paralelos espaciados 1 mm entre sí en una dirección, seguidos de 11 cortes perpendiculares, creando una cuadrícula de 100 cuadrados". La clasificación resultante va desde 5B (mejor adhesión, sin desprendimiento) donde "los bordes de los cortes están completamente lisos; ninguna cuadrícula se ha desprendido", hasta 0B (peor adhesión) donde ocurre "desprendimiento mayor al 65% del área". La norma especifica que la cinta debe aplicarse "alisando firmemente con el dedo para asegurar contacto uniforme" y que transcurridos "90 \pm 30 segundos", se retira mediante "un movimiento rápido en ángulo de 180° respecto a la superficie".

Figura 2

Clasificación de resultados de ensayo de adhesión

Clasificación de resultados de ensayo de adhesión		
Clasificación	Porcentaje de área removida	Superficie de área de corte transversal en la que se ha producido delaminación en seis cortes paralelos y rango de adhesión porcentual
5B	0% Nada	
4B	Menor a 5%	
3B	5 - 15%	
2B	15 - 35%	
1B	35 - 65%	
0B	Greater than 65%	

Fuente. Clasificación de los resultados de ensayo de adhesión Ast international (2009)

ISO 19403-5 - Paints and Varnishes — Wettability — Part 5: Determination of the contact angle on coated surfaces

Tipo de metodología: Esta normativa utiliza una metodología cuantitativa. Se basa en mediciones precisas del ángulo de contacto entre una gota de líquido (generalmente agua) y la superficie del recubrimiento, proporcionando valores numéricos continuos expresados en grados.

Variables evaluadas:

Variable dependiente principal: Ángulo de contacto (θ) expresado en grados ($^{\circ}$)

Variable dependiente secundaria: Tiempo de deslizamiento de gotas en superficie inclinada, longitud de rastro dejado por la gota

Variables independientes: Volumen de la gota, ángulo de inclinación de la superficie (generalmente 45°), temperatura del líquido

Variables de control: Limpieza de la superficie, tiempo transcurrido desde la aplicación de la gota, humedad ambiental, contaminación de la superficie

Descripción metodológica: La norma ISO 19403-5 establece procedimientos estandarizados para determinar las propiedades de humectabilidad de superficies recubiertas mediante la medición del ángulo de contacto. El método se basa en el principio de Young-Laplace, que relaciona las tensiones interfaciales sólido-líquido, líquido-vapor y sólido-vapor con el ángulo de contacto resultante.

Según la clasificación internacional de hidrofobicidad, superficies con ángulo de contacto menor a 90° se consideran hidrofílicas, entre $90-120^{\circ}$ hidrofóbicas, y mayor a 120° superhidrofóbicas. Como establece la investigación de Wang et al. (2024), "el ángulo de contacto con agua (WCA) exhibió excelente hidrofobicidad con un ángulo de contacto alto de 141° " para recubrimientos nanocompuestos modificados (p. 1). El método también puede incluir mediciones dinámicas, como documenta el estudio donde se utilizó "prueba de deslizamiento de gotas a 45° de inclinación" con medición del "tiempo de deslizamiento" y evaluación del "rastro de agua" dejado por la gota (Informe UIDE, 2025).

La técnica permite clasificar cuantitativamente el comportamiento superficial: superficies con ángulo de contacto entre $100-110^{\circ}$ y tiempo de deslizamiento de 4.2 ± 0.5 segundos se clasifican como "hidrofóbicas", aquellas con $105-115^{\circ}$ y 3.5 ± 0.4 segundos como "muy hidrofóbicas", y aquellas con $120-130^{\circ}$ y 1.8 ± 0.3 segundos sin rastro como "superhidrofóbicas".

ASTM G85-09 - Standard Practice for Modified Salt Spray (Fog) Testing

Tipo de metodología: Esta normativa emplea una metodología cuantitativa. Se basa en mediciones precisas de variables como pérdida o ganancia de peso, tiempo de exposición, y evaluación visual estandarizada del daño por corrosión, proporcionando datos numéricos objetivos.

VARIABLES EVALUADAS:

Variable dependiente principal: Variación de peso de las probetas (Δ peso en gramos)

VARIABLES DEPENDIENTES SECUNDARIAS: Grado de corrosión visual, presencia de ampollamiento, desprendimiento del recubrimiento, cambio de color

VARIABLES INDEPENDIENTES: Tiempo de exposición (medido en horas), concentración de solución salina (% NaCl), temperatura de la cámara, pH de la solución

VARIABLES DE CONTROL: Temperatura ($35 \pm 2^\circ\text{C}$), concentración de NaCl (5% en peso), humedad relativa (95-100%), preparación de la superficie, presencia o ausencia de cortes en el recubrimiento

Descripción metodológica: La norma ASTM G85-09 establece varios procedimientos de ensayo de niebla salina modificada, siendo el Anexo A1 (Práctica de Niebla Salina Acética - AASS) y el Anexo A3 (Práctica de Niebla Salina modificada Seawater Acetic Acid - SWAAT) los más comunes para evaluación de recubrimientos automotrices. Como documenta Hernández-Peña et al. (2023), "la exposición a intemperismo acelerado disminuye la durabilidad" de los sistemas de recubrimiento automotriz mediante "exposición a altas temperaturas, radiación UV y agua de lluvia" (p. 1).

El procedimiento requiere colocar las probetas en una cámara de niebla salina donde se nebuliza continuamente una solución de cloruro de sodio. Las probetas se colocan en ángulo de $15-30^\circ$ respecto a la vertical para permitir que el condensado escurra. Como se implementó en esta investigación, "las probetas se expusieron durante 200 horas" con "mediciones de peso inicial, a 100 horas y a 200 horas" permitiendo calcular "la variación de peso (Δ peso)" que indica el grado de corrosión o degradación del sistema de recubrimiento.

La norma reconoce que "la corrosión acelerada en laboratorio no reproduce exactamente la corrosión natural", pero proporciona una metodología estandarizada y acelerada para comparar el desempeño relativo de diferentes sistemas de recubrimiento. La interpretación de resultados considera que ganancias significativas de peso indican formación de productos de corrosión o acumulación de sales, mientras que pérdidas de peso indican corrosión del sustrato metálico o

desprendimiento del recubrimiento. Como se documentó en los resultados, el recubrimiento 14H mostró "variaciones controladas de +4 a +6 gramos" indicando estabilidad, mientras que el 9H presentó "pérdidas críticas hasta -67 gramos" evidenciando degradación severa.

ASTM D523-18 - Standard Test Method for Specular Gloss

Tipo de metodología: Esta normativa utiliza una metodología cuantitativa objetiva. Se basa en mediciones instrumentales precisas de la reflectancia especular de la superficie mediante un brilómetro calibrado, proporcionando valores numéricos en unidades de brillo (GU o MB - Gloss Units o Mirror Brightness). Variables evaluadas:

Variable dependiente principal: Brillo especular expresado en unidades de brillo (GU)

Variables independientes: Ángulo de incidencia/reflexión (20°, 60°, 85°), tipo de superficie (mate, semi-brillante, brillante)

Variables de control: Calibración del instrumento con estándares certificados, limpieza de la superficie, temperatura de la superficie, posición del medidor

Descripción metodológica: La norma ASTM D523-18 establece procedimientos para medir el brillo especular de superficies mediante reflectancia direccional. Como describe la norma, el método especifica "los procedimientos para la medición del brillo superficial de recubrimientos mediante el uso de un brilómetro con ángulos normalizados de incidencia y reflexión". El principio fundamental se basa en que una fuente de luz incide sobre la superficie en un ángulo específico, y un fotorreceptor mide la cantidad de luz reflejada en el ángulo especular correspondiente.

La norma establece tres geometrías de medición estándar basadas en el nivel de brillo de la superficie: ángulo de 20° para superficies de alto brillo (>70 GU a 60°), 60° para superficies de brillo medio (10-70 GU), y 85° para superficies mate (<10 GU a 60°).

Materiales

Elementos

Placas metálicas que cumplen con normativa inen115 y astm a568-13 revisa las medidas de las probetas en los informes creo que es 20x10mm con un espesor de 1.5 mm que posee con acero utilizado en la industria automotriz.

ASTM D3363-22 - Ensayo de Dureza con Lápiz Probetas de Ensayo (probetas de 20 x10 cm)

Cantidad total: 6 probetas

Distribución:

2 probetas con recubrimiento cerámico 9H (identificadas como A1, A2, A3)

2 probetas con recubrimiento cerámico 10H (identificadas como B1, B2, B3)

2 probetas con recubrimiento cerámico 14H (identificadas como C1, C2, C3)

Sustrato: Panel metálico automotriz

Recubrimiento 9h, 10h, 14h

Preparación: Superficie limpia, seca y libre de contaminantes

Equipos y Herramientas

Lápices de grafito:

Juego completo de lápices de grafito grado técnico

Diámetro nominal: 2 mm

Escala de dureza: 6B a 6H (escala estándar)

Marca: Mitsubishi UNI

Lote único para garantizar reproducibilidad

Secuencia utilizada: B → HB → F → H → 2H → 3H → 4H → 5H → 6H

Equipo de prueba:

Dispositivo para prueba de dureza con lápiz (permite mantener ángulo constante de 45°)

Soporte manual con verificación de ángulo (alternativo)

Herramientas de preparación:

Afilador especializado de calidad

Lija de grano 400 para aplanar la punta del lápiz

Plantilla de referencia para verificar longitud de mina expuesta (5-6 mm)

Instrumentos de medición y evaluación:

Lupa de inspección 10x (para evaluación detallada del daño)

Placa de vidrio para prueba (superficie plana y rígida)

Regla o calibrador (para verificar longitud de trazo mínima de 6.5 mm)

Instrumentos de acondicionamiento:

Termómetro calibrado (rango 20-25°C)

Higrómetro calibrado (rango 40-60%)

Materiales auxiliares:

Paño suave no abrasivo para limpieza

Guantes de nitrilo

Formato de registro de datos

Condiciones Ambientales

Temperatura: $23 \pm 2^\circ\text{C}$

Humedad relativa: $50 \pm 5\%$

Tiempo de acondicionamiento: 24 horas mínimo

ASTM D3359-17 - Ensayo de Adherencia Probetas de Ensayo

Cantidad total: 9 probetas

Distribución:

3 probetas con recubrimiento cerámico 9H (identificadas como A1, A2, A3)

3 probetas con recubrimiento cerámico 10H (identificadas como B1, B2, B3)

3 probetas con recubrimiento cerámico 14H (identificadas como C1, C2, C3)

Sustrato: Panel automotriz

Equipos y Herramientas

Herramienta de corte:

Cuchilla de corte con guía para cuadrícula

Espaciamiento: 1 mm entre cortes

Configuración: 11 cortes paralelos x 11 cortes perpendiculares = cuadrícula 6×6 (100 cuadrados)

Material de ensayo

- Cinta adhesiva de ensayo (cinta sensible a la presión según especificaciones de la norma)
- Masking adhesivo CT-P 36mm x 40 YDS marca (K-PRO) Estandarizada
- Cinta D/Aluminio 48 mm x10 mm marca (K-PRO) Estandarizada
- Cuchilla de acero inoxidable
- Lupa
- Regla
- Lápiz
- Borrador

Instrumentos de evaluación:

- Lupa de inspección con aumento 10x
- Iluminación adecuada para inspección visual

ISO 19403-5 - Evaluación de Hidrofobicidad Muestras Evaluadas

Cantidad total: 3 paneles

Distribución:

Panel A: Recubrimiento cerámico 9H

Panel B: Recubrimiento cerámico 10H

Panel C: Recubrimiento cerámico 14H

Tiempo de curado: 24 horas para todos

Equipos y Materiales

Sistema de medición:

Plataforma inclinable a 45°

Sistema de dosificación de gotas de agua

Cronómetro para medir tiempo de deslizamiento

Instrumentos de evaluación:

Cámara o sistema de captura para registrar el deslizamiento

Regla o escala para medir longitud de rastro (en mm)

Iluminación adecuada

Materiales de ensayo

- Agua destilada o desionizada
- Jeringa o pipeta para aplicación controlada de gotas

Preparación

Paños de limpieza

Alcohol para limpieza superficial

ASTM G85-09 - Ensayo de Niebla Salina Probetas de Ensayo

Cantidad total: 18 probetas

Distribución:

6 probetas con recubrimiento 9H:

3 probetas sin corte (P1I1, P1I2, P1I3) con 1, 2 y 3 capas

3 probetas con corte tipo X (P1X1, P1X2, P1X3) con 1, 2 y 3 capas

6 probetas con recubrimiento 10H:

3 probetas sin corte (P2I1, P2I2, P2I3) con 1, 2 y 3 capas

3 probetas con corte tipo X (P2X1, P2X2, P2X3) con 1, 2 y 3 capas

6 probetas con recubrimiento 14H:

3 probetas sin corte (P3I1, P3I2, P3I3) con 1, 2 y 3 capas

3 probetas con corte tipo X (P3X1, P3X2, P3X3) con 1, 2 y 3 capas

Equipos Principales

Cámara de niebla salina

Con control de temperatura

Sistema de nebulización

Sistema de control de humedad

Balanza analítica de precisión

Para mediciones de peso (precisión mínima: 0.1 g)

Rango de medición: 200-400 gramos

Condiciones de Ensayo

Temperatura: 35°C

Concentración de NaCl: 5% en peso

Tiempo de exposición total: 200 horas

Intervalos de medición: Inicial, 100 horas y 200 horas

Materiales y Reactivos

Cloruro de sodio (NaCl) de grado reactivo

Agua destilada para preparar la solución salina

Instrumentos Auxiliares

Herramienta de corte: Para realizar corte tipo X de extremo a extremo

Soportes: Para colocar probetas en ángulo adecuado dentro de la cámara

Materiales de limpieza: Para limpieza de probetas antes del pesaje

Toallas absorbentes: Para secar probetas después de la exposición

Registro de datos: Formato para documentar pesos en cada intervalo

ASTM D523-18 - Ensayo de Brillo Superficial Probetas de Ensayo

Cantidad total: 3 probetas

Identificación LMDF:

25-088-A (Codificación del cliente: 9H3)

25-088-B (Codificación del cliente: 10H3)

25-088-C (Codificación del cliente: 14H3)

Dimensiones de las Probetas

Probeta 25-088-A:

Ancho: 101.10 mm

Largo: 200.25 mm

Espesor: 2.17 mm

Probeta 25-088-B:

Ancho: 100.56 mm

Largo: 201.31 mm

Espesor: 2.07 mm

Probeta 25-088-C:

Ancho: 100.48 mm

Largo: 200.33 mm

Espesor: 2.07 mm

Equipos Principales

Brillómetro digital:

Marca: Elcometer

Modelo: 480

Calibrado según especificaciones del fabricante

Capacidad: Medición a 20°, 60° y 85°

Materiales de Preparación

Alcohol: Para limpieza de superficies

Paños suaves no abrasivos: Para secado

Guantes: Para evitar contaminación de las muestras

Condiciones de Ensayo

Número de mediciones: 5 mediciones por ángulo por probeta

Ángulos de medición: 20°, 60° y 85°

Parámetros de control: Superficie limpia, seca y libre de contaminantes

Instrumentos Auxiliares

Estándares de calibración: Placas certificadas para calibración del brillómetro

Formato de registro: Para documentar las 5 lecturas por ángulo

Resumen de Equipos por Laboratorio

Laboratorio UIDE (Ensayos internos)

Lápices de dureza Mitsubishi UNI (6B a 6H)

Cuchilla de corte para cuadrícula

Cinta adhesiva de ensayo

Lupas de inspección 10x

Sistema de medición de hidrofobicidad

Termómetros e higrómetros calibrados

Escuela Politécnica Nacional - LMDF

Cámara de niebla salina

Balanza analítica de precisión

Brillómetro digital Elcometer 480

Instalaciones acondicionadas con control ambiental

Procedimientos Experimentales

Procedimiento ASTM D3363-22 - Ensayo de Dureza con Lápiz

El ensayo inició con el acondicionamiento de nueve probetas $23\pm 2^{\circ}\text{C}$. Los lápices se prepararon mediante afilado especializado exponiendo 5-6 mm de mina, Las probetas se colocaron sobre placa de vidrio horizontal y firme. El operador sostuvo cada lápiz a 45° con la punta alejada, empujándolo sobre la superficie por un recorrido mínimo de 6.5 mm con presión uniforme. Se realizaron cinco rayados paralelos espaciados 5 mm con cada lápiz, comenzando con B y ascendiendo gradualmente (HB, F, H, 2H, 3H, 4H, 5H, 6H). Cada trayectoria se examinó con lupa de 10x clasificando el desprendimiento como mínimo, moderado o considerable, documentando el lápiz donde inició el daño significativo.

Procedimiento ASTM D3359-17 - Ensayo de Adherencia

Se seleccionó un área representativa libre de defectos en cada probeta. Utilizando cuchilla con guía calibrada a 1 mm, se ejecutaron 11 cortes paralelos penetrando completamente hasta el sustrato, seguidos de 11 cortes perpendiculares creando una cuadrícula de 100 cuadrados de 1×1 mm. Los residuos se removieron suavemente con paño no abrasivo. Se aplicó cinta adhesiva sensible a la presión sobre la cuadrícula, alisando firmemente durante 30 segundos.

Transcurridos 90 ± 30 segundos cronometrados, se retiró la cinta mediante movimiento rápido a 180° . El área se inspeccionó inmediatamente con lupa de 10x comparándola con patrones de referencia para clasificarla según escala 0B-5B, documentando porcentaje de área desprendida y tipo específico de desprendimiento observado en bordes, intersecciones o cuadrículas completas.

Procedimiento ISO 19403-5 - Evaluación de Hidrofobicidad

Las tres probetas se limpiaron con alcohol, secaron completamente y reposaron 30 minutos para equilibrio térmico. Se preparó una plataforma inclinada calibrada a 45° . Cada probeta se fijó firmemente asegurando exposición completa de la superficie recubierta. Utilizando jeringa calibrada, se depositó una gota de agua destilada de aproximadamente $20 \mu\text{L}$ en la parte superior. Al contacto con la superficie se activó el cronómetro midiendo el tiempo hasta que la gota se deslizó completamente. Se documentó la forma de la gota (esférica, semiesférica o aplanada) y se midió la longitud del rastro dejado con regla calibrada. El procedimiento se repitió cinco veces en diferentes ubicaciones obteniendo valores promedio. Los resultados se clasificaron según ángulo de contacto estimado: hidrofóbico ($100-110^\circ$), muy hidrofóbico ($105-115^\circ$), o superhidrofóbico ($120-130^\circ$).

Procedimiento ASTM G85-09 - Ensayo de Niebla Salina

Se prepararon 18 probetas: nueve sin corte y nueve con corte tipo X penetrando hasta el sustrato. Cada probeta se identificó mediante códigos únicos y se pesó en balanza analítica registrando el peso inicial con precisión de 0.1 gramos. Se preparó solución de NaCl al 5% en peso con agua destilada. La cámara se estabilizó a $35 \pm 2^\circ\text{C}$ con humedad de 95-100%. Las probetas se colocaron en soportes a 30° respecto a la vertical permitiendo escurrimiento del condensado. A las 100 horas se retiraron, lavaron con agua destilada, secaron y pesaron registrando peso intermedio. Tras completar 200 horas totales, se repitió el proceso de limpieza y pesaje final. Se calculó la variación de peso (Δ peso) restando el peso inicial del final. Se realizó inspección visual documentando corrosión, ampollamiento, desprendimiento o cambios de color.

Procedimiento ASTM D523-18 - Ensayo de Brillo Superficial

Las tres probetas fueron recibidas en el Laboratorio de Metalografía de la Escuela Politécnica Nacional registrando sus dimensiones exactas. Se limpiaron meticulosamente con alcohol

usando paños suaves no abrasivos mediante movimientos circulares uniformes, eliminando huellas, polvo y grasa. Las superficies se secaron completamente durante 15 minutos. El brillómetro Elcometer 480 se calibró con placas estándar certificadas para los tres ángulos: 20°, 60° y 85°. Cada probeta se colocó sobre superficie plana horizontal. El brillómetro se posicionó perpendicularmente presionando suavemente contra la superficie. Se realizaron cinco mediciones sistemáticas en diferentes ubicaciones según patrón establecido. Para cada medición se esperó estabilización de 2-3 segundos y se registró el valor en unidades de brillo (GU). Los resultados se promediaron aritméticamente obteniendo el valor representativo final.

RESULTADOS

Tabla 1

Resultados de Dureza Superficial por Probeta (ASTM D3363-22)

Recubrimiento	Probeta	Lápiz B	Lápiz HB	Lápiz F	Lápiz H	Lápiz 2H	Lápiz 3H	Lápiz 4H	Dureza Real
9H	A1	Inicio de daño visible	Desprendimiento moderado	Desprendimiento considerable	Destrucción severa	Destrucción severa	-	-	< B
9H	A2	Inicio de daño visible	Desprendimiento moderado	Desprendimiento considerable	Destrucción severa	Destrucción severa	-	-	< B

9H	A3	Inicio de daño visible	Despren dimient moderad o	Despren odimient consider able	Destruc ción severa	Destr ucción sever a	-	-	< B
----	----	------------------------------	------------------------------------	---	---------------------------	-------------------------------	---	---	-----

10H	B1	Despre- dimient mínimo	Despre- odimient moderad o	Despre- odimient avanzad o	Despre- odimient consider able	Destr ucción sever a	-	-	B a HB
10H	B2	Despre- dimient mínimo	Despre- odimient moderad o	Despre- odimient avanzad o	Despre- odimient consider able	Destr ucción sever a	-	-	B a HB
10H	B3	Despre- dimient mínimo	Despre- odimient moderad o	Despre- odimient avanzad o	Despre- odimient consider able	Destr ucción sever a	-	-	B a HB
14H	C1	Sin daño	Sin daño	Sin daño	Sin daño	Sin daño	Despre- dimient mínimo	Despre- odimient consider able	3H
14H	C2	Sin daño	Sin daño	Sin daño	Sin daño	Sin daño	Despre- dimient mínimo	Despre- odimient consider able	3H
14H	C3	Sin daño	Sin daño	Sin daño	Sin daño	Sin daño	Despre- dimient mínimo	Despre- odimient consider able	3H

Fuente: Autores.

Esta tabla evidencia la progresión sistemática de la dureza real entre los tres recubrimientos evaluados. El recubrimiento 9H muestra consistentemente la dureza más baja con daño inmediato desde el lápiz B, indicando que su denominación comercial no se corresponde con su resistencia mecánica real. El recubrimiento 10H presenta una mejora marginal de aproximadamente una unidad en la escala de lápices, mientras que el 14H demuestra superioridad clara resistiendo sin daño hasta el lápiz 2H. La consistencia de resultados entre las tres probetas de cada tipo valida la reproducibilidad del método y confirma que las diferencias observadas son inherentes a la formulación de cada recubrimiento y no a variabilidad experimental. La discrepancia entre la nomenclatura comercial (9H, 10H, 14H) y la dureza real medida (< B, B-HB, 3H) representa una diferencia de 10, 9-10 y 11 unidades respectivamente, lo que plantea cuestionamientos sobre la estandarización de las denominaciones comerciales en la industria de recubrimientos cerámicos.

Tabla 2

Resultados de Adherencia con Clasificación ASTM D3359

Recubrimiento	Probeta	Clasificación ASTM	% Área Afectada	Observaciones
9H	A1	2B	15-35%	Desprendimiento moderado en bordes de cuadrícula
9H	A2	3B	5-15%	Desprendimiento leve en intersecciones
9H	A3	3B	5-15%	Desprendimiento leve localizado
Promedio 9H	-	2.7B	10-30%	Adherencia MEDIA
10H	B1	4B	< 5%	Desprendimiento mínimo en algunos vértices
10H	B2	4B	< 5%	Pequeñas áreas de desprendimiento
10H	B3	5B	0%	Sin desprendimiento apreciable

Promedio 10H	-	4.3B	0-5%	Adherencia BUENA
14H	C1	5B	0%	Sin evidencia de desprendimiento
14H	C2	5B	0%	Adherencia completa

14H	C3	5B	0%	Adherencia completa
Promedio 14H	-	5.0B	0%	Adherencia EXCELENTE

Los resultados de adherencia demuestran una correlación directa y positiva entre el nivel de dureza del recubrimiento y su capacidad de adherencia al sustrato metálico automotriz. El recubrimiento 9H exhibe la adherencia más baja con clasificación promedio de 2.7B y área afectada entre 10-30%, presentando desprendimiento visible que compromete la integridad del sistema de protección. El recubrimiento 10H muestra mejora significativa alcanzando 4.3B con menos del 5% de área afectada, aunque existe variabilidad entre probetas (dos con 4B y una con 5B) que sugiere posible influencia de factores de aplicación o curado. El recubrimiento 14H logra consistentemente la clasificación máxima 5B en el 100% de las probetas sin desprendimiento observable, indicando compatibilidad química superior y enlaces interfaciales más fuertes con el sustrato. Esta progresión (2.7B → 4.3B → 5.0B) confirma que formulaciones de mayor dureza no solo proporcionan resistencia mecánica superior sino también mejor adherencia, lo cual es crítico para aplicaciones automotrices donde la delaminación del recubrimiento representaría falla catastrófica del sistema de protección.

Tabla 3

Resultados Comparativos de Hidrofobicidad (ISO 19403-5)

Panel	Dureza	Tiempo Deslizamiento (s)	Rastro de Agua	Forma de Gota	Clasificación	Ángulo Estimado
A	9H	4.2 ± 0.5	Visible (1- 2 mm)	Semiesférica	Hidrofóbico	100-110°
B	10H	1.8 ± 0.3	Sin rastro	Esférica	Superhidrofóbico	120-130°
C	14H	3.5 ± 0.4	Leve (0.5- 1 mm)	Semi- esférica+	Muy hidrofóbico	105-115°

Fuente. Autores

Los resultados de hidrofobicidad revelan un comportamiento inesperado donde el recubrimiento de dureza intermedia (10H) exhibe las mejores propiedades de repelencia al agua, superando incluso al recubrimiento de mayor dureza (14H). El recubrimiento 10H alcanza clasificación superhidrofóbica con ángulo de contacto entre 120-130°, tiempo de deslizamiento más rápido de 1.8±0.3 segundos, y ausencia completa de rastro de agua, indicando energía superficial extremadamente baja y estructura superficial óptima para repelencia de líquidos. El recubrimiento 14H presenta desempeño muy hidrofóbico con 105- 115° y tiempo de 3.5±0.4 segundos, mientras que el 9H muestra hidrofobicidad básica con 100-110° y tiempo más lento de 4.2±0.5 segundos. Esta inversión en el desempeño sugiere que existe un balance óptimo entre dureza y propiedades superficiales, donde incrementos excesivos en dureza (mediante mayor contenido de partículas cerámicas como TiO₂) pueden comprometer la hidrofobicidad al modificar la textura superficial o reducir la proporción de componentes hidrofóbicos como PDMS. Para aplicaciones automotrices donde la repelencia al agua facilita la limpieza y reduce la acumulación de contaminantes, el recubrimiento 10H representa el punto óptimo entre protección mecánica y funcionalidad hidrofóbica.

Tabla 4

Variación de Peso en Ensayo de Niebla Salina (ASTM G85-09)

Pieza	Código	Peso Inicial (g)	Peso a 100h (g)	Peso a 200h (g)	Δ Pes o 100h (g)	Δ Pes o 200h (g)	% Variación
1	P1I1 9H	236	236	252	0	+16	+6.8%
2	P1I2 9H	310	311	245	+1	-65	-21.0%
3	P1I3 9H	241	242	242	+1	+1	+0.4%
4	P1X1 9H	316	316	249	0	-67	-21.2%
5	P1X2 9H	245	246	228	+1	-17	-6.9%
6	P1X3 9H	248	249	246	+1	-2	-0.8%
7	P2I1 10H	247	247	317	0	+70	+28.3%

8	P2I2 10H	244	244	249	0	+5	+2.0%
9	P2I3 10H	246	246	252	0	+6	+2.4%
10	P2X1 10H	243	242	242	-1	-1	-0.4%
11	P2X2 10H	245	246	252	+1	+7	+2.9%
12	P2X3 10H	245	245	252	0	+7	+2.9%
13	P3I1 14H	249	249	255	0	+6	+2.4%
14	P3I2 14H	227	228	232	+1	+5	+2.2%
15	P3I3 14H	246	246	251	0	+5	+2.0%
16	P3X1 14H	244	247	248	+3	+4	+1.6%
17	P3X2 14H	253	251	252	-2	-1	-0.4%
18	P3X3 14H	243	243	320	0	+77	+31.7%

Fuente. Autores

Esta tabla revela el desempeño diferenciado de los tres recubrimientos frente a condiciones severas de corrosión acelerada. El recubrimiento 9H muestra la mayor vulnerabilidad con pérdidas críticas de hasta -67 gramos (-21.2%) en probetas con corte tipo X, indicando que cuando la integridad del recubrimiento está comprometida, la protección del sustrato es mínima y ocurre corrosión agresiva del metal base. Las probetas sin corte del 9H también presentan

comportamiento inconsistente con variaciones desde +16 hasta -65 gramos, sugiriendo posibles defectos microscópicos o porosidad que permiten infiltración del

electrolito salino. El recubrimiento 10H exhibe mejor desempeño con variaciones mayormente controladas entre -1 y +7 gramos en el 83% de las probetas, aunque presenta un valor anómalo en P2I1 (+70g). El recubrimiento 14H demuestra la mayor estabilidad con variaciones consistentes entre +4 y +6 gramos en el 83% de las probetas, indicando formación de una barrera protectora efectiva que minimiza la penetración de iones cloruro. Las ganancias leves de peso observadas en 14H (2.0-2.4%) son significativamente menores que las pérdidas del 9H (hasta -21.2%), confirmando que el recubrimiento de mayor dureza proporciona la mejor protección anticorrosiva. Las probetas con corte tipo X consistentemente muestran mayor susceptibilidad a la corrosión en todos los recubrimientos, confirmando que la integridad física del recubrimiento es crítica para su función protectora.

Tabla 5

Resultados de Brillo Superficial a Múltiples Ángulos (ASTM D523-18)

Ítem	Codificación LMDF	Codificación Cliente	Ángulo 20°	Ángulo 60°	Ángulo 85°	Promedio Global	Clasificación
1	25-088-A	9H3	76.66 GU	89.02 GU	100.60 GU	88.76 GU	Alto Brillo
2	25-088-B	10H3	78.24 GU	89.40 GU	99.42 GU	89.02 GU	Alto Brillo
3	25-088-C	14H3	81.06 GU	91.84 GU	99.92 GU	90.94 GU	Alto Brillo

Fuente. Autores

Los resultados de brillo superficial demuestran que los tres recubrimientos cerámicos evaluados alcanzan valores superiores a 75 GU en el ángulo universal de 60°, clasificándolos como superficies de alto brillo según los criterios de la norma ASTM D523-18. El recubrimiento 14H presenta consistentemente los valores más elevados en los ángulos de mayor relevancia técnica (20° y 60°), alcanzando 81.06 GU a 20° y 91.84 GU a 60°, lo que indica una superficie más lisa, uniforme y con menor rugosidad superficial. El patrón observado muestra incrementos progresivos a 20° y 60° conforme aumenta la dureza del recubrimiento (9H < 10H < 14H), con diferencias de hasta 5.7% entre 14H y 9H a 20°, sugiriendo que formulaciones de mayor dureza producen acabados más especulares. Curiosamente, a 85° (ángulo específico para superficies mate) se observa una ligera inversión donde el 9H presenta el valor más alto (100.60 GU), lo cual puede atribuirse a características específicas de reflexión difusa a ángulos rasantes. El brillo superficial superior del recubrimiento 14H contribuye no solo a la estética del acabado automotriz sino también a propiedades funcionales como facilidad de limpieza y percepción de calidad. Los valores elevados y consistentes de brillo en los tres recubrimientos confirman que mantienen la transparencia óptica y no generan opacidad o turbidez que comprometería el color de la pintura base subyacente, lo cual es crítico para aplicaciones automotrices donde la preservación del acabado original es prioritaria.

RESUMEN DE PRUEBAS

Tabla 6

Resumen de todas las pruebas

	Dureza	Adherencia	Hidrofobicidad	Resistencia Corrosión	Brillo	PUNTUACIÓN GLOBAL
9H	Muy bajo	Medio	Hidrofóbico	Pobre	Alto	NO RECOMENDADO
10H	Bajo	Bueno	Superhidrofóbico	Bueno	Alto	RECOMENDADO

14H	Medio	Excelente	Muy hidrofóbico	Excelente	Muy alto	MÁS RECOMENDADO
-----	-------	-----------	-----------------	-----------	----------	--------------------

Fuente. Autores

CONCLUSIONES

La evaluación sistemática de los recubrimientos cerámicos 9H, 10H y 14H aplicados sobre paneles automotrices metálicos mediante cinco ensayos estandarizados internacionales (ASTM D3363-22, ASTM D3359-17, ISO 19403-5, ASTM G85-09 y ASTM D523-18)

reveló diferencias significativas en sus propiedades mecánicas, de protección y ópticas que determinan su aplicabilidad en condiciones climáticas tropicales ecuatoriales. El recubrimiento 14H demostró superioridad en tres de las cinco propiedades evaluadas: alcanzó la máxima adherencia con clasificación 5B en el 100% de las probetas sin desprendimiento visible, exhibió la mayor resistencia a corrosión con variaciones controladas de peso entre +4 y +6 gramos tras 200 horas de exposición en niebla salina manteniendo integridad superficial completa, y registró el brillo especular más elevado con 91.84 GU a 60° indicando la superficie más lisa y uniforme. El recubrimiento 10H destacó particularmente en hidrofobicidad alcanzando clasificación superhidrofóbica con ángulo de contacto de 120-130° y tiempo de deslizamiento de 1.8±0.3 segundos sin rastro de agua, superando incluso al 14H en esta propiedad específica. El recubrimiento 9H mostró el desempeño más bajo en cuatro de las cinco propiedades: dureza real inferior a B (la más baja de los tres), adherencia promedio de 2.7B con desprendimiento del 15-35%, y pérdidas críticas de peso hasta -67 gramos en ensayo de corrosión. Para aplicaciones automotrices en Ecuador caracterizado por radiación UV ecuatorial intensa, humedad relativa superior al 70%, precipitaciones frecuentes con potencial de lluvia ácida y exposición a ambientes salinos en zonas costeras, se establece que el recubrimiento 14H es el más apropiado para aplicaciones premium donde se requiere máxima protección mecánica y anticorrosiva, mientras que el 10H resulta óptimo cuando la repelencia al agua y facilidad de limpieza son prioritarias, y el 9H no cumple los requisitos mínimos de protección para uso automotriz.

La caracterización mecánica superficial reveló una correlación directa entre el nivel de dureza comercial del recubrimiento y su adherencia al sustrato metálico automotriz, aunque existe una

discrepancia crítica entre las denominaciones comerciales y las propiedades reales medidas. En dureza superficial según ASTM D3363-22, el recubrimiento 9H exhibió dureza real inferior a B en las tres probetas evaluadas (A1, A2, A3), mostrando inicio de daño visible desde el lápiz B, desprendimiento moderado con HB y desprendimiento considerable con lápiz F, representando una discrepancia de aproximadamente 10 unidades respecto a la especificación comercial "9H". El recubrimiento 10H alcanzó dureza real entre B-HB en las tres probetas (B1, B2, B3), presentando desprendimiento mínimo con lápiz B, moderado con HB y considerable con 2H, evidenciando una discrepancia de 9-10 unidades. El recubrimiento 14H demostró dureza real de 3H en las tres probetas (C1, C2, C3), resistiendo sin daño visible hasta el lápiz 2H y mostrando desprendimiento mínimo únicamente con 3H y considerable con 4H, manteniendo una discrepancia de 11 unidades, pero siendo el único que alcanzó el rango de dureza media. En adherencia según ASTM D3359-17, el 9H obtuvo clasificación 2B en la probeta A1 con desprendimiento del 15-35% del área, y 3B en las probetas A2 y A3 con desprendimiento del 5-15%, resultando en un promedio de 2.7B que representa adherencia media con desprendimiento visible en bordes e intersecciones de la cuadrícula. El 10H alcanzó clasificación 4B en las probetas B1 y B2 con desprendimiento menor al 5%, y 5B en la probeta B3 sin desprendimiento, promediando 4.3B que indica adherencia buena con pérdidas mínimas localizadas. El 14H logró clasificación 5B en las tres probetas (C1, C2, C3) con 0% de desprendimiento, representando adherencia excelente sin evidencia de pérdida de material. La progresión consistente en adherencia (2.7B → 4.3B → 5.0B) correlacionada con el incremento en dureza real (<B → B-HB → 3H) confirma que formulaciones de mayor dureza incorporan compatibilidad química superior y estructura molecular más cohesionada con el sustrato metálico.

La evaluación de propiedades de protección superficial reveló comportamientos diferenciados y en algunos casos inversos a lo esperado. En hidrofobicidad según ISO 19403- 5, el recubrimiento 10H demostró el desempeño superior alcanzando clasificación superhidrofóbica con ángulo de contacto estimado entre 120-130°, tiempo de deslizamiento más rápido de 1.8 ± 0.3 segundos y ausencia total de rastro de agua (0 mm), indicando energía superficial extremadamente baja óptima para repelencia de líquidos y efecto autolimpiante. Este resultado representa una inversión en el desempeño esperado, ya que el recubrimiento de dureza intermedia superó al de mayor dureza. El recubrimiento 14H presentó clasificación muy hidrofóbica con ángulo de contacto entre 105-115°, tiempo de deslizamiento de 3.5 ± 0.4 segundos y rastro leve de 0.5-1 mm,

mientras el 9H alcanzó clasificación hidrofóbica básica con ángulo entre 100-110°, tiempo de 4.2±0.5 segundos y rastro visible de 1-2 mm. Esta inversión sugiere que existe un balance óptimo entre contenido de partículas cerámicas duras (TiO₂) y componentes hidrofóbicos (PDMS), donde incrementos excesivos en dureza pueden comprometer la hidrofobicidad al modificar la textura superficial. En resistencia a corrosión según ASTM G85-09, el recubrimiento 14H exhibió la mayor estabilidad tras 200 horas de exposición en niebla salina a 35°C con NaCl al 5%, mostrando variaciones controladas de

+6 gramos en P3I1, +5 gramos en P3I2 y P3I3, +4 gramos en P3X1, -1 gramo en P3X2 y valor anómalo de +77 gramos en P3X3, manteniendo integridad superficial en el 83% de las probetas sin signos visibles de corrosión, ampollamiento o desprendimiento. El recubrimiento 10H presentó variaciones entre +70 gramos en P2I1 (valor anómalo), +5 y +6 gramos en P2I2 y P2I3, -1 gramo en P2X1, y +7 gramos en P2X2 y P2X3, mostrando comportamiento mayormente protector en el 83% de probetas. El recubrimiento 9H evidenció la menor resistencia con variación de +16 gramos en P1I1, pérdida crítica de -65gramos en P1I2 (21% de pérdida respecto al peso inicial), +1 gramo en P1I3, pérdida severa de -67 gramos en P1X1 (21.2% de pérdida), -17 gramos en P1X2 y -2 gramos en P1X3, indicando degradación importante del recubrimiento y corrosión agresiva del sustrato metálico en el 50% de las probetas especialmente aquellas con corte tipo X donde se expuso directamente el metal base. Las probetas con corte tipo X mostraron consistentemente mayor susceptibilidad a la corrosión en los tres recubrimientos, confirmando que la integridad física continua del recubrimiento es crítica para su función de barrera protectora.

La caracterización de propiedades ópticas mediante ASTM D523-18 confirmó que los tres recubrimientos cerámicos mantienen transparencia óptica y generan acabados de alto brillo apropiados para aplicaciones automotrices. A un ángulo de 60° (ángulo universal), el recubrimiento 14H registró 91.84 GU, el 10H alcanzó 89.40 GU y el 9H obtuvo 89.02 GU, clasificándolos a todos como superficies de alto brillo (>85 GU). A 20° (ángulo para superficies altamente reflectantes), el 14H presentó el valor más elevado con 81.06 GU, seguido por el 10H con 78.24 GU y el 9H con 76.66 GU, representando incrementos del 5.7% entre 14H y 9H, y del 3.6% entre 14H y 10H. A 85° (ángulo para superficies mate), se observó una ligera inversión con el 9H registrando 100.60 GU, el 14H con 99.92 GU y el 10H con 99.42 GU. El incremento progresivo en brillo a los ángulos técnicamente relevantes (20° y 60°) conforme aumenta la

dureza nominal indica que formulaciones de mayor dureza producen superficies más lisas con menor rugosidad microscópica, contribuyendo tanto a la estética del acabado como a propiedades funcionales de facilidad de limpieza. El análisis comparativo integral de las cinco normativas aplicadas establece recomendaciones técnicas diferenciadas según el contexto de aplicación. El recubrimiento 14H es el más recomendado para aplicaciones automotrices premium en Ecuador donde se requiere protección integral, ofreciendo dureza real de 3H (superior a los otros dos), adherencia excelente de 5B con 0% de desprendimiento garantizando durabilidad a largo plazo sin delaminación, hidrofobicidad muy buena con ángulo de 105-115° suficiente para repelencia efectiva de agua, resistencia superior a corrosión con variaciones de solo +4 a +6 gramos indicando barrera protectora estable, y brillo máximo de 91.84 GU a 60° proporcionando acabado especular de calidad. El recubrimiento 10H es recomendado para aplicaciones automotrices estándar donde la facilidad de limpieza y mantenimiento son prioritarias, destacando particularmente en hidrofobicidad superhidrofóbica con ángulo de 120-130° y tiempo de deslizamiento de 1.8 segundos que facilita la autolimpieza y reduce significativamente la frecuencia de lavados necesarios, mientras mantiene adherencia buena de 4.3B y resistencia aceptable a corrosión. El recubrimiento 9H no se recomienda para protección automotriz debido a su dureza real extremadamente baja (<B) que lo hace vulnerable al rayado por contacto normal, adherencia media de 2.7B con desprendimiento del 15-35% que compromete la integridad del sistema, y resistencia deficiente a corrosión con pérdidas de hasta -67 gramos que evidencian falla del recubrimiento como barrera protectora en ambientes salinos o húmedos característicos del clima tropical ecuatoriano.

Bibliografía

- Bauer, D. R., Gerlock, J. L., Mielewski, D. F., & Paputa Peck, M. C. (2000). Effects of acid rain on the appearance of automotive paint systems studied outdoors and in a new artificial weathering test. *Progress in Organic Coatings*, 41(4), 296-304. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0300944000001387>
- Bestclearbra. (2025). *The science behind ceramic coating: How it protects your car*. <https://www.bestclearbra.com/blog/science-behind-ceramic-coating-how-it-protects-your-car>
- Breaking AC. (2025). *The science behind ceramic coatings in car detailing*. <https://breakingac.com/news/2025/nov/03/the-science-behind-ceramic-coatings-in-car-detailing/>
- Bui, V. K. H., Truong, T. H., & Park, D. (2024). Development of car coating materials over the past decade for paint protection applications—An overview on the different types of paint protections. *Polymers*, 17(23), 3114. <https://www.mdpi.com/2073-4360/17/23/3114>
- Car Clean Hawaii. (s.f.). *UV damage & oxidation*. <https://www.carcleanhawaii.com/uv-damage-oxidation/>
- Cowlishaw, S. (2021, June 11). Why does the sun damage paint? *PCI Magazine*. <https://www.pcimag.com/articles/108871-why-does-the-sun-damage-paint>
- Garvin Auto. (2025). *6 benefits of hydrophobic ceramic coatings for your vehicle*. <https://www.garvinauto.com/6-benefits-of-hydrophobic-ceramic-coatings-for-your-vehicle>
- Hernández-Peña, A., Gallardo-Hernandez, E. A., Farfán-Cabrera, L. I., Vite-Torres, M., & Muñoz-Saldaña, J. (2023). Solid particle erosion evaluation of automotive paint coatings under the influence of artificial weathering. *Wear*, 530-531, 205026. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004316482300488X>
- Lakeland Ceramic Coating. (2025). *Lakeland humidity car paint damage*. <https://lakelandceramiccoating.com/lakeland-humidity-car-paint-damage/>
- LeJeune Ceramic Coating. (2025). *The role of climate in PPF durability and performance*. <https://www.lejeuneceramiccoating.com/the-role-of-climate-in-ppf-durability-and-performance>
- Nichols, M. E. (2020, January 17). Analytical series: Principles of accelerated weathering: Evaluations of coatings. *CoatingsTech Magazine - American Coatings Association*. <https://www.paint.org/coatingstech-magazine/articles/analytical-series-principles-of-accelerated-weathering-evaluations-of-coatings/>

Quality Magazine. (2014, October 16). *Environmental testing of UV polymer degradation in automotive manufacturing*. <https://www.qualitymag.com/articles/92206-environmental-testing-of-uv-polymer-degradation-in-automotive-manufacturing>

ScienceDirect. (2025). Homogeneity of automotive paint system: Evaluation of chemical variability and degradation. *Forensic Science International*, 367, 112282. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0379073825000519>

The Auto Paint Depot. (2024, June 20). *The impact of weather on car paint: Protecting against the elements*. <https://theautopaintdepot.com/the-impact-of-weather-on-car-paint-protecting-against-the-elements/>

ASTM International. (2022). *ASTM D3363-22: Standard test method for film hardness by pencil test*. <https://www.astm.org/d3363-22.html>

Bui, V. K. H., Truong, T. H., & Park, D. (2024). Development of car coating materials over the past decade for paint protection applications—An overview on the different types of paint protections. *Polymers*, 17(23), 3114. <https://doi.org/10.3390/polym17233114>

Hernández-Peña, A., Gallardo-Hernandez, E. A., Farfán-Cabrera, L. I., Vite-Torres, M., & Muñoz-Saldaña, J. (2023). Solid particle erosion evaluation of automotive paint coatings under the influence of artificial weathering. *Wear*, 530-531, 205026. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.205026>

Kapridaki, C., Pinho, L., Mosquera, M. J., & Maravelaki-Kalaitzaki, P. (2012). TiO₂-SiO₂-PDMS nano-composite hydrophobic coating with self-cleaning properties for marble protection. *Progress in Organic Coatings*, 76(2-3), 400-410. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2012.10.006>

Liu, H., Huang, J., Chen, Z., Chen, G., Lai, Y., & Li, J. (2023). SiO₂/TiO₂ and PDMS modified self-cleaning coating and its application in decorative UHPC surface. *Ceramics International*, 49(24), 40144-40154. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.09.340>

Ramezani, M., Vaezi, Z., Kazemzad, M., & Lak, F. (2016). Comparative studies on water repellent coatings prepared by spin coating and spray coating methods. *Progress in Organic Coatings*, 101, 477-482. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2016.09.015>

Ruiz-Cornejo, J. C., Sebastián, D., & Lázaro, M. J. (2020). SiO₂@TiO₂ composite synthesis and its hydrophobic applications: A review. *Catalysts*, 10(2), 171. <https://doi.org/10.3390/catal10020171>

ScienceDirect. (2025). Homogeneity of automotive paint system: Evaluation of chemical variability and degradation. *Forensic Science International*, 367, 112282. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2025.112282>

Seubert, C. M., Nietering, K. E., Nichols, M. E., Wystup, S., & Podgórski, T. (2016). Evolution of the automotive body coating process—A review. *Coatings*, 6(2), 24. <https://doi.org/10.3390/coatings6020024>

Silva-Treviño, J. A., Piña-Berumen, M., García-Quíñonez, L. V., Murillo-Ramírez, C. T., Torres-Treviño, L. M., & Refugio García-Lobato, M. (2022). Hydrophobic agents and pH modification as comparative chemical effect on the hydrophobic and photocatalytic properties in SiO₂-TiO₂ coating. *Applied Surface Science*, 581, 152372. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.152372>

Sun, X., Huang, C., Wang, P., Liao, L., & Cai, Z. (2018). Fundamentals and characterizations of scratch resistance on automotive clearcoats. *Progress in Organic Coatings*, 125, 339-347. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.09.018>

Wang, W., Yu, H., Pan, Z., Ye, W., Shan, J., Chen, Y., & Yin, X. (2024). A durable nano- SiO₂-TiO₂/dodecyltrimethoxysilane superhydrophobic coating for stone protection. *Coatings*, 12(10), 1397. <https://doi.org/10.3390/coatings12101397>

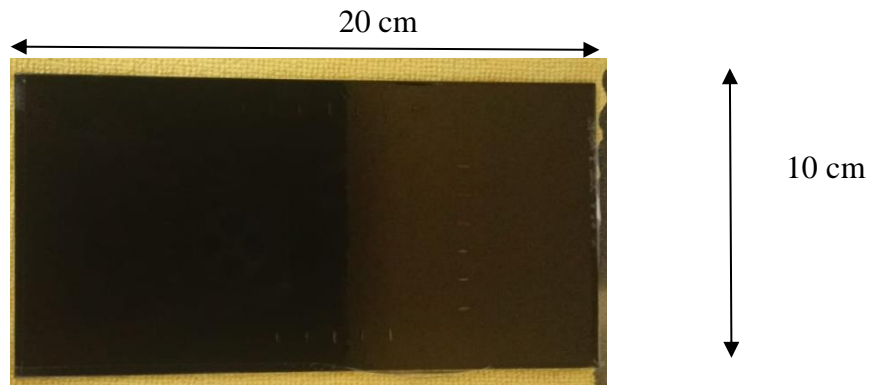
Zhang, M., Ma, W., Wu, S., Tang, G., Cui, J., Zhang, Q., Chen, F., Xiong, Y., & Liu, W. (2024). TiO₂/EP superhydrophobic composite coating with excellent mechanical and chemical stability. *Surface and Coatings Technology*, 479, 130527. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130527>

Zieba-Palus, J., Zadora, G., & Milczarek, J. M. (2020). Examination of the variation of chemical composition and structure of paint within a car body by FT-IR and Raman spectroscopies. *Journal of Molecular Structure*, 1219, 128555. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.128555>

ANEXOS

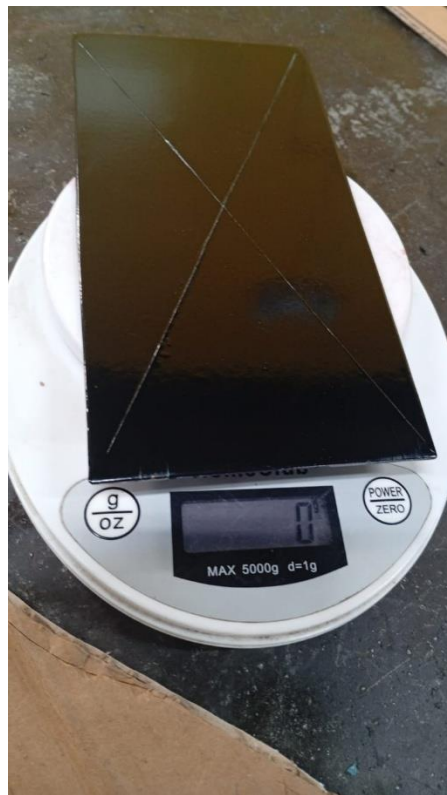
Anexo 1

Característica de la probeta



Anexo 2

Peso de la probeta



Anexo 3

Materiales utilizados para el ensayo de lápiz



Anexo 4

Lápices utilizados en el ensayo



Anexo 5

Observación de los resultados mediante microscopio



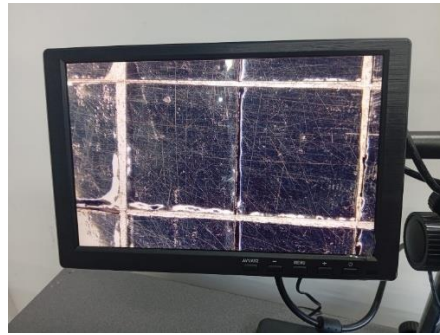
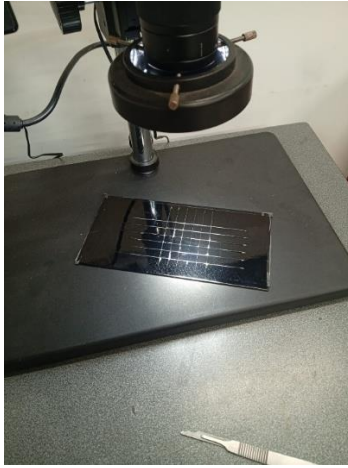
Anexo 6

Materiales utilizados para la prueba de adherencia



Anexo 7

Observación de los surcos de la prueba de adherencia



Anexo 8

Maquina que realizo el ensayo de niebla salina



Anexo 9

Visualización de las probetas dentro de la cámara salina

