

CIATEQ, A. C. Centro de Tecnología Avanzada  
Dirección de Posgrado



*Modificación de línea de pintura para mejora del  
desempeño del recubrimiento en autopartes*

TESIS QUE PRESENTA

**Ing. José Gerardo Salinas Ocampo**  
**Asesor: Dr. José Manuel Rojas García**  
**Co-asesor: Dr. Luis Edmundo Lugo Uribe**

Para obtener el grado de

**Maestría en  
Manufactura Avanzada**

Zapopan, Jalisco  
mayo, 2022

## CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR



GOBIERNO DE  
MÉXICO



CONACYT  
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología




Guadalajara, Jalisco, 28 de marzo del 2022.

Mtro. Geovany González Carlos  
Coordinador Académico de Posgrado  
CIATEQ, A.C.

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del Ing. Jose Gerardo Salinas Ocampo, una vez revisado su Proyecto Terminal de tesis/tesina, titulado "Modificación de línea de pintura para mejora del desempeño del recubrimiento en autopartes" **autorizamos** que el citado trabajo sea presentado por el alumno para su revisión, con el fin de alcanzar el grado de **Maestría en Manufactura Avanzada**.

Sin otro particular por el momento, Agradecemos la atención prestada.

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Luis Edmundo Lugo Uribe  
Co-Asesor Académico

  
\_\_\_\_\_  
Dr. José Manuel Rojas García  
Asesor Académico

F31a Revisión: 01-Jun-2021

Círculo de la Industria Poniente Lote 11, Manzana 3, No. 11, Col. Parque Industrial Exhacienda Doña Rosa,  
CP. 52004, Lerma, Estado de México, México. Tel: +52 (722) 262 07 50 www.ciateq.mx



## CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR



GOBIERNO DE  
MÉXICO



CONACYT  
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



San Luis Potosí, San Luis Potosí, 26 de abril del 2022.

Mtro. Geovany González Carlos  
Coordinador Académico  
CIATEQ, A.C.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del (la) alumno (a) José Gerardo Salinas Ocampo, cuyo título es:

**"Modificación de línea de pintura para mejora del desempeño del recubrimiento en autopartes"**

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el (la) alumno(a), y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

Atentamente,

Dr. Víctor Hugo Mercado Lemus

F31b Revisión: 01-Mar-2021

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de tesis a mi familia, que durante todo el periodo del posgrado me tuvieron paciencia y apoyo, el tiempo que pude haber pasado en esta corta vida, fue desviado. La huella que estamos obligados en dejar en este mundo sea visible para muchos y no solo para esas tres personitas que me están mirando todo el tiempo. Mi esposa Laura Jiménez que siempre ha estado pendiente de que tenga tiempo para desarrollar este posgrado, los amo, Laura, José Arturo, José Gerardo y José Angel. Todo por ustedes.

## AGRADECIMIENTOS

Durante pandemia y crisis se hicieron los procesos más complicados, en lo personal, laboral y académico, por lo que, muchas personas, empresas e instituciones tuvieron que hacer un esfuerzo adicional para continuar con proyectos, algunos realizados sin contratiempos, otros pospuestos y pocos cancelados. Sin embargo, el progreso debía continuar y los tiempos pedían sacrificios.

Primeramente, tengo que agradecer a Dios, por todas sus bendiciones y oportunidades que puso en mi camino, los padres, hermanos, mi familia y amigos, todo te quedo muy bien.

Mis padres, Arturo Salinas y Ma. Trinidad Ocampo su apoyo para realizar una preparación profesional, su ejemplo de prosperar con trabajo, carácter y respeto, fomentaron en mí la búsqueda de liderazgo, y siguen siendo un ejemplo.

Mi familia, sacrificamos recursos y tiempo, ustedes me sostienen todos los días, me motivan a continuar, mi deseo de ser ejemplo y algún día verlos y apoyarlos en sus proyectos.

Agradecimiento a CIATEQ, sus catedráticos y personal administrativo, su programa, la orientación, promoción y motivación para iniciar, mantener y finalizar el posgrado, en tiempos complicados se adaptaron y nos adaptaron. A mi asesor el Dr. Jose M. Rojas y co-asesor Dr. Luis Lugo por su tiempo, sus aportaciones y consejos.

A mis compañeros de posgrado, aunque muchas veces bromeamos, peleamos, también nos apoyamos, nos alentamos, nos explicamos con o sin paciencia llegamos los 5 al final de este posgrado, Jesús Sánchez, Iván Castellanos, Emilio González e Israel Iñiguez, fue menos difícil con ustedes.

A la empresa ZF Suspension Technology Guadalajara, por proporcionarme las facilidades en tiempo para poder desarrollar el posgrado, la confianza otorgada será contribuida.

## RESUMEN

La aplicación de pintura en componentes automotrices tiene distintas funciones, tales como otorgar propiedades cosméticas y dar protección medio ambiental debido a que los materiales metálicos utilizados tienden a corroerse. El presente documento presenta una propuesta de proceso de pintura estándar para autopartes en zona de chasis por medio de método electrostático que conlleva el cambio de metodología de aplicación de una a dos capas, una capa de material de tipo epóxico y otra capa de tipo poliuretano, y la evaluación de los recubrimientos a través de pruebas que simulan las condiciones que debe soportar en cuanto a resistencia a la corrosión y a la pérdida de color.

Para el establecimiento del proceso adecuado se consideró la tecnología y capacidades de los materiales propuestos. En este proyecto se utilizaron 3 opciones de materiales para la aplicación de recubrimiento primario y dos materiales para la aplicación del secundario y se utilizó la metodología de diseño de experimentos estadísticos para determinar los parámetros significativos que impactan en el desempeño del recubrimiento. Debido a que las pruebas son prolongadas y los equipos de medición tienen capacidad limitada, el tamaño de muestra fue reducido, pero las tendencias observadas permitieron concluir sobre la selección de las características del recubrimiento que permiten mejorar la resistencia a la corrosión y a la pérdida de color, así como para la selección del material primario y secundario con una característica Wet to Wet (aplicación de pintura en húmedo) fundamental para evitar instalación de hornos y enfriadores.

**Palabras clave:** Pintura primaria, Pintura superior, Recubrimiento, Resistencia a la corrosión, Aplicación wet-to-wet.

## ABSTRACT

The application of paint on automotive components has different functions, such as providing cosmetic properties and providing environmental protection, since the metallic materials used tend to corrode. This document presents a proposal for a standard painting process for auto parts in the chassis area by means of the electrostatic method that involves changing the application methodology from one to two layers, one layer of epoxy-type material and another layer of polyurethane type, and the evaluation of the coatings through tests that simulate the conditions they must withstand in terms of resistance to corrosion and color loss.

For the establishment of the adequate process, the technology and capacities of the proposed materials were considered. In this project, 3 materials were used for the application of the primary coating and two materials for the application of the secondary coating, and the methodology for the design of statistical experiments was applied to determine the significant parameters that impact the performance of the coating. Due to the fact that the tests are prolonged and the measurement equipment has limited capacity, the sample size was reduced, but the observed trends allowed us to conclude on the selection of the characteristics of the coating that allow improving the resistance to corrosion and loss of color, as well as for the selection of the primary and secondary material with a Wet to Wet characteristic (application of wet paint) fundamental to avoid the installation of ovens and coolers.

**Keywords:** Primer, Topcoat, Coating, Corrosion resistance, Wet to wet application.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN .....	v
ABSTRACT .....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS .....	xii
GLOSARIO .....	xiii
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. ANTECEDENTES .....	3
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	4
1.3. JUSTIFICACIÓN .....	5
1.4. OBJETIVOS.....	6
1.4.1. Objetivo general.....	6
1.4.2. Objetivos específicos .....	6
1.5. HIPÓTESIS.....	6
2. MARCO TEÓRICO .....	7
2.1. PREPARACIÓN DE ACERO PARA PINTAR.....	7
2.1.1. Fosfatizado .....	7
2.1.2. Óxido de circonio.....	12
2.1.3. Funciones de las etapas de un proceso de conversión.....	14
2.1.4. Etapas requeridas en proceso de conversión de fosfato de zinc .....	16
2.2. PRUEBAS DE DESEMPEÑO DE RECUBRIMIENTO .....	36
3. PROCEDIMIENTO.....	46
3.1. FACTORES .....	48
3.2. ELABORACIÓN DE PRUEBAS DE CORROSIÓN .....	51
3.3. ELABORACIÓN DE PRUEBAS DE INTERPERISMO .....	56
4. RESULTADOS .....	62
4.1. RESULTADO DE PRUEBA DE CORROSIÓN.....	67
4.2. RESULTADO DE PRUEBA DE INTEMPERISMO .....	76
4.3. FACTIBILIDAD TÉCNICA .....	79
CONCLUSIONES .....	87
RECOMENDACIONES .....	89



APORTACIÓN DE LA TESIS.....	91
APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS.....	92
REFERENCIAS.....	93
ANEXO A .....	96

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ciclo de vida del acero. ....	2
Figura 2 Suministro de recursos energéticos a línea de pintura. ....	3
Figura 3 Imagen de superficie metálica con recubrimiento de fosfato de zinc. ....	10
Figura 4 Ejemplo de configuración de proceso de recubrimiento por conversión. ....	14
Figura 5 Imagen de un vehículo partido. ....	18
Figura 6 Carrocería y chasis de vehículos pesados. ....	19
Figura 7 Composición de pintura por electrodeposición. ....	22
Figura 8 Partes de etapa de aplicación de pintura por electrodeposición. ....	23
Figura 9 Representación de los componentes de pintura en el en la fina, Izquierda: sin corriente aplicada, Derecha con corriente aplicada. ....	25
Figura 10 Atracción estática. ....	26
Figura 11 Esquema de aplicación de pintura por electrostática a la izquierda, derretimiento de las partículas en el horneo a la derecha ....	30
Figura 12 Izquierdo, simulación de corte seccional con una capa de pintura, derecha: simulación de corte seccional con dos capas de pintura. ....	36
Figura 13 Ejemplo de equipo de prueba para corrosión acelerada. ....	38
Figura 14 Tipos de rayado previo a prueba de corrosión acelerada. ....	39
Figura 15 Evaluación de condición de rayado después de exposición a prueba de corrosión acelerada. ....	40
Figura 16 Exposición a solución acida. ....	41
Figura 17 Exposición al aceite. ....	41
Figura 18 Exposición al anticongelante. ....	42
Figura 19 Ejemplo de equipo de resistencia a la grava. ....	43
Figura 20 Equipo de prueba de impacto. ....	44
Figura 21 Vista de una muestra después de prueba de impacto. ....	44
Figura 22 Equipo para prueba de flexión. ....	45
Figura 23 Diagrama de flujo, procedimiento de desarrollo de pruebas. ....	46
Figura 24 Comportamiento de temperatura y humedad, muestra el cambio de ciclo 1 y 2 los lunes y viernes en el segundo periodo de 12 horas del día. ....	53
Figura 25 Forma de cortes al objeto de prueba. ....	54

Figura 26 Método de medición de avance de corrosión. ....	55
Figura 27 Medición de brillo mediante un emisor de luz y un lente detector, los grados son de acuerdo requerimiento y se generan a partir del eje vertical. ....	57
Figura 28 Escala para establecer una calificación para pérdida de color. ....	59
Figura 29 Equipo para comparación de color. ....	60
Figura 30 Forma de observación de las muestras. ....	61
Figura 31 Exposición a prueba del concentrador de seguimiento de la luz solar STCT, a)24 meses, b)30 meses, c) 36 meses. ....	62
Figura 32 Pruebas iniciales sometidas a prueba de corrosión, a) Recubrimiento de dos capas epóxico como primario y poliuretano como secundario resiste la prueba, b) solo poliuretano, se aprecia el desprendimiento del recubrimiento. ....	63
Figura 33 Corte seccional de muestra a Figura 13, para revisar la interfaz entre las capas. ....	64
Figura 34 (Izquierda) Imagen de un tubo antes de proceso de pretratamiento, se observa brillante y residuos de proceso anteriores. (derecha) Se observa tubo sin brillo y gris opaco. ....	66
Figura 35(Izquierda) Imagen a 1000 aumentos con SEM en esta imagen se aprecia la densidad de cristales. (Derecha) imagen a 9000 aumentos con SEM, se puede medir los tamaños de los cristales en micrómetros. ....	67
Figura 36 Imagen representativa para determinar el peso de recubrimiento, diferencial de peso antes y después de remover área determinada de fosfato de zinc. ....	67
Figura 37 Imagen representativa de pieza sometida a corrosión cíclica, de lado izquierdo. De lado derecho se observa la medición del avance de corrosión. ....	68
Figura 38 Gráfica de normalidad de residuos. ....	71
Figura 39 Residuos contra ajuste. ....	72
Figura 40 Residuos contra orden. ....	73
Figura 41 Análisis de varianza de acuerdo con resultados de corrosión. ....	74
Figura 42 Gráfica de efectos principales para avance de corrosión individual. ....	75
Figura 43 Gráfico de interacción de efecto con interacción de variables para avance de corrosión, mostrando límite de aceptación máximo. ....	76
Figura 44 Recubrimiento estándar de carrocería de un vehículo. ....	79

Figura 45 Proceso estándar para pintura de carrocería. ....	80
Figura 46 Proceso actual de pintura con interacción cliente /proveedor. ....	81
Figura 47 Proceso de pintura optimizado. ....	81
Figura 48 Proceso de pintura de una sola capa, usual en partes de chasis. ....	82
Figura 49 Proceso de pintura propuesto para aplicación de dos capas. ....	83
Figura 50 Configuración real de acuerdo con propuesta. ....	85
Figura 51 Lay Out de implementación de proceso de doble capa en espacio disponible. ....	86

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resumen del contenido de tres artículos de revisión destacados sobre tecnologías de recubrimientos previos a aplicación de pintura.....	13
Tabla 2 Resumen de normas en relación con recubrimientos de convención de OEM. ....	15
Tabla 3 Propiedades generales de la pintura, las columnas muestran Check Box donde aplica las pruebas. ....	20
Tabla 4 Comparativo de espesor de pintura y eficiencia de transferencia para 3 tipos de métodos de aplicación de pintura primaria.....	28
Tabla 5 Creación de diseño factorial, el factor tipo de pintura de 3 niveles y el factor aditivo de dos niveles. ....	50
Tabla 6 Comparativos de criterios de evaluación entre normas europeas y normas americanas. ....	55
Tabla 7 Resultados de pruebas de acuerdo con DOE propuesto.....	69
Tabla 8 Resultados para objetivo 3 y 4 utilizando dos diferentes componentes de pintura superior.....	78

## GLOSARIO

**Bastidor:** (Frame, en inglés). El bastidor es un elemento estructural del chasis diseñado para dar rigidez y soporte al vehículo.

**Chasis:** (Chassis, en inglés). El chasis es la composición de las partes que se ensamblan bajo la carrocería, como el bastidor, motor, suspensión, etc.

**Carrocería:** (Body car, o bodywork en inglés). La carrocería es la parte que proporciona el habitáculo del vehículo, es la parte visual. Es decir, la carrocería constituye la estética, aerodinámica y protección de los pasajeros contra el ambiente, así como los impactos.

**EDS, EDX:** (energy dispersive X-ray analysis). Es una técnica analítica utilizada para el análisis elemental o caracterización química de una muestra.

**Fosfatizado:** (Phosphating, en inglés). Es un recubrimiento de conversión que se aplica a componentes de acero o hierro y se usa principalmente como método de pretratamiento junto con otro método de protección contra la corrosión.

**Intemperismo:** (Weatherability, en inglés). La resistencia a la intemperie es la capacidad de un material o estructura para soportar, resistir o soportar condiciones climáticas atmosféricas adversas, como temperaturas extremadamente calientes o frías, humedad, aire salado o condiciones corrosivas similares.

**Pintura primaria:** La pintura primaria o imprimación (Primer coat, en inglés) es la primera capa de pintura que se aplica sobre una pieza con preparación previa.

**Pintura superior:** La capa superior (Top coat, en inglés) es la última capa aplicada, en algunos casos es transparente o con pigmentos, se considera la primera línea de defensa de un sistema de recubrimientos.

**Recubrimiento:** (Coating, en inglés). Una capa de cualquier sustancia aplicada sobre una superficie.

**SEM:** (Scanning Electron Microscope por sus siglas en inglés). Funciona por la acción del haz de electrones enfocado en lugar de luz para "obtener imágenes" de la muestra y obtener información sobre su estructura y composición (Nanoscience, 2022).

**VOC's:** (Volatile Organic Compounds por sus siglas en inglés). Son compuestos volátiles orgánicos, se encuentran dentro de los disolventes de pintura y se desprenden durante el secado o endurecimiento de pintura.

**Wet to wet:** Refiere a característica de aplicar una capa de pintura fresca sobre otra capa de pintura fresca.

## 1. INTRODUCCIÓN

Se estima que en el 2013 el costo global de corrosión fue de US\$ 2.5 trillones que equivale al 3.4% del PIB global sin considerar las consecuencias ambientales o de seguridad. (Koch, y otros, 2016). Factores como ambientes salinos, lluvia acida, exposiciones solares, humedad, altas temperaturas, son unos de los principales promotores de corrosión. Los costos y estos factores son los motivos de diversas investigaciones en tratamientos previos para aplicación de recubrimientos, investigación en recubrimientos, equipos de aplicación y el proceso de aplicación.

La pintura como recubrimiento tiene sus funciones estéticas, pero más importante es que cumpla con el objetivo de protección de la superficie contra la corrosión y las condiciones de intemperie, la diferencia entre estas dos características básicamente es la exposición ambiental, ya que se puede estar expuesta a la corrosión, pero no al intemperismo, que es la condición combinada de irradiación solar, humedad y temperatura.

La corrosión es la degradación de las propiedades de los materiales en la interacción del entorno y es un efecto inevitable (Kelly, Shaw, & Kelly, 2006). El acero es una aleación metálica que cuyo estado más estable es en forma de óxido de hierro al combinarse con el oxígeno en un proceso al que llamamos oxidación o corrosión. Los efectos de la corrosión en el acero pueden interferir en el ciclo de vida del acero que se muestra en la Figura 1, ya que al presentar corrosión se reduce su durabilidad y se afectan sus propiedades, disminuyendo el número de ciclos de uso y reciclado al que puede ser sometido.



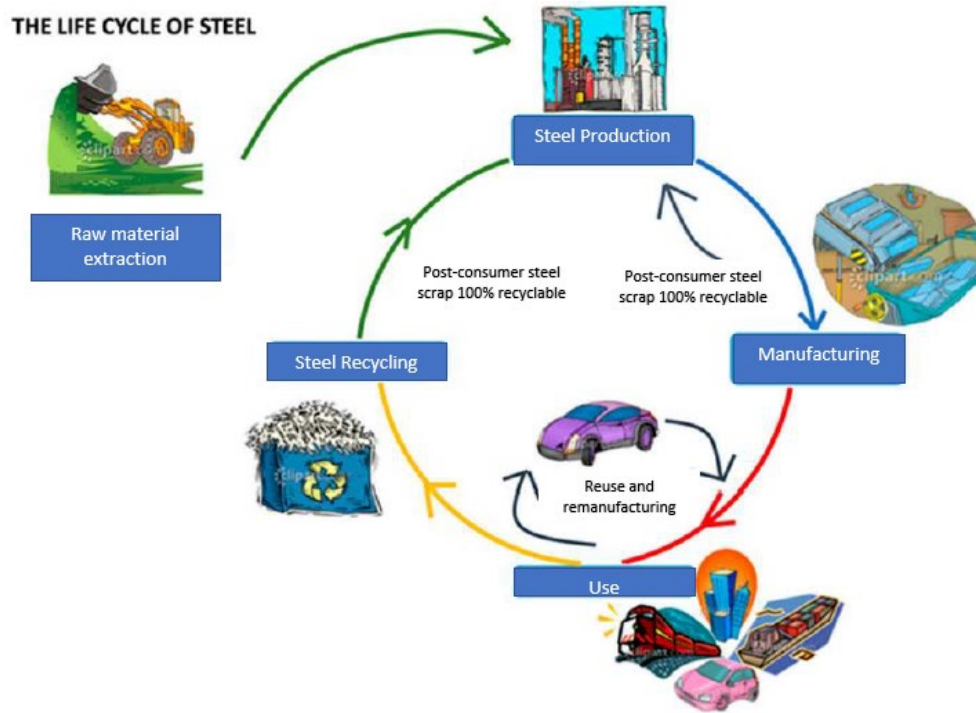


Figura 1 Ciclo de vida del acero.  
(Liu Ping, 2017)

Los procesos de pintura automotriz inician en la industria con la necesidad de mantener una estética en los vehículos y durabilidad de estos, hoy en día la investigación académica ha enriquecido y aportado el desarrollo de materiales y procesos con la finalidad de proporcionar opciones ordenadas y sustentadas.

Los procesos de pintura inician en el tratamiento previo del sustrato hasta su inspección final, durante todo este proceso se debe controlar y mantener condiciones atmosféricas, temperatura de baños, hornos, ambientes de humedad, enfriamiento, para lograr esto, se cuenta con quemadores, calderas, chiller, manejadoras de aire, bombas y motores. Por lo que se deben suministrar recursos como gas natural, agua y energía eléctrica, además de generar residuos considerados peligrosos como filtros sucios, lodos de fosfato, grasas removidas a las piezas, químicos utilizados y residuos de agua tratada. Xu (Zhanbo, Qing-Shan, Xiaohong, & Jianxiang, 2013) afirma que en los procesos de pintura “Se consume aproximadamente 60 % de energía que es requerida para una planta de ensamble

de automóviles". La Figura 2 es un esquema de suministro de energéticos al que faltaría agregar los residuos generados.

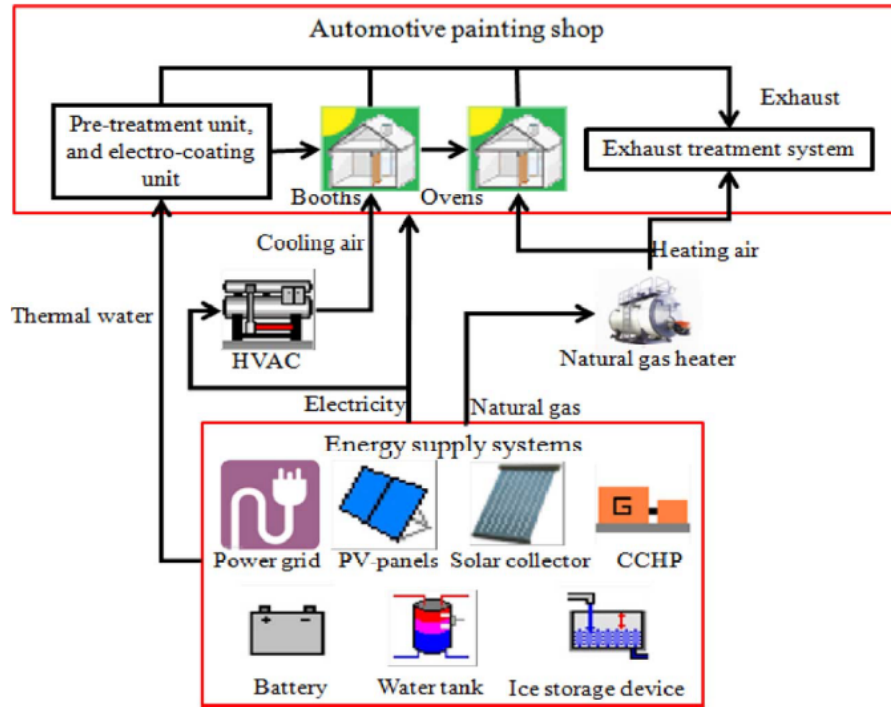


Figura 2 Suministro de recursos energéticos a línea de pintura.  
(Xu,2013)

En mi experiencia (17 años) en procesos de pintura he visto como este tipo de procesos requieren de estricto control de proceso y comparto la idea de Toda (Toda, Salazr, & Saito, 2013) "El taller de pintura está ubicado en el centro de la planta. Aunque la pintura ocupa un lugar importante, la pintura no ha recibido un tratamiento tan importante, en comparación con otras áreas de la ingeniería.". Existe una cantidad alta de condiciones que pueden afectar el proceso, al ocurrir una falla, encontrar la causa y ajustar conlleva tiempo prolongado, situación que resulta ser pernicioso para cualquier compañía.

## 1.1. ANTECEDENTES

Los diseños de vehículos, el mercado y la exigencia de cliente buscan obtener un producto más duradero; esto motiva a los fabricantes a implementar nuevos

procesos, adaptarse al cambio, la competitividad y tendencias. La competencia de los manufactureros ha llevado a realizar fusiones. Cuando las fusiones suceden, el conocimiento evoluciona de acuerdo con las experiencias de las compañías, lo que produce una nueva especificación de fabricación de sus componentes y los proveedores tienen que innovar sus procesos para cumplir con los nuevos estándares.

Actualmente, la compañía suministra a los manufactureros automotrices y de vehículo pesado componentes de suspensión, se cuenta con procesos de pintura electrostática con estándares que se aplican en plantas de la división en Alemania, España, Turquía y China. Estos estándares cubren los requerimientos de corrosión de diversos clientes.

El proceso de aplicación de pintura requiere de una preparación de superficie basado en un proceso de recubrimiento de conversión de fosfato de zinc sobre metal y sobre este recubrimiento de fosfato se aplica pintura epóxica por método electrostático. El recubrimiento se valida mediante pruebas de corrosión compuesta y resistencia a los químicos, con la modificación del proceso se deberá evaluar las mismas condiciones y se le añaden prueba de resistencia que simulan irradiación solar, mediante estas pruebas se evaluará el desempeño del recubrimiento aplicado.

## **1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

A pesar de que los estándares actuales cubren eficientemente los requerimientos, existen condiciones de interés para los clientes que el proceso actual no es capaz de alcanzar.

Para mantener y captar el mercado es necesario cumplir con los requerimientos de cliente, actualmente el alcance de la línea de pintura electrostática es la generación de un recubrimiento de conversión llamado fosfato de zinc, sobre este recubrimiento se aplica una capa de pintura orgánica epóxica, pero este

recubrimiento no tiene capacidad de reflexión de la luz por lo que se degrada al someterse a la radiación solar.

La pintura base poliuretano y/o acrílico son muy eficientes al reflejar la luz solar pero no muy buenas para una resistencia corrosiva. Por consecuencia se debe pensar en aplicaciones de pintura adicionales, para obtener el rendimiento de cada tecnología de pintura.

Para aplicar una segunda capa de pintura es necesario la modificación de la línea de pintura para que de manera sistemática se aplique una capa epóxica y sobre esta una capa de pintura poliuretano.

Existen compañías que se dedican a la aplicación de pintura para terceros. Sin embargo, el precio resulta ser más competitivo si el proceso es interno, por tal motivo es importante el estudio de este proyecto.

### **1.3. JUSTIFICACIÓN**

La flexibilidad en los procesos para cubrir diferentes necesidades particulares representa una inversión para cualquier compañía y debe estar plenamente justificada. La elaboración de esta investigación abre un campo de oportunidad para las diversas plantas de la división que cuentan con aplicación de pintura por método electrostático. Así mismo, la compañía en el mercado de la suspensión automotriz y de vehículos pesados otorga un valor agregado, un diferenciador y opción a bajo precio.

Con la modificación de la línea de pintura se puede implementar la aplicación de dos capas de pintura de manera sistemática para mejorar el rendimiento de resistencia a la corrosión y la resistencia a la exposición solar de la suspensión de vehículos pesados.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo general**

Dentro de la industria automotriz y vehículos pesados se cuenta con normas de fabricación específicas de cliente, para una compañía que provee a diversos clientes debe considerar cada requerimiento. Por lo que el objetivo general es: estudiar la factibilidad técnica de modificar una línea de pintura electrostática para lograr la aplicación de dos capas de recubrimiento que proporcione mayor resistencia a la irradiación solar en la suspensión de vehículos pesados.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

Para lograr esto se establecen los siguientes objetivos específicos:

1. Definir las pinturas para cubrir los requerimientos.
2. Identificar requerimientos específicos de pintura del cliente.
3. Identificar método pruebas y equipos de elaboración de pruebas.
4. Determinar alternativas tecnológicas para la modificación del equipo para aplicación del recubrimiento en la suspensión de vehículos pesados.

## **1.5. HIPÓTESIS**

H1: La aplicación de un recubrimiento de dos capas de pintura, una de base epóxica aplicada como primera capa y una segunda capa base poliuretano aplicada como capa superior, es capaz de generar tanto una mayor resistencia a la corrosión como un aumento de la resistencia a la irradiación solar en piezas de suspensión de vehículos pesados.

H2: La modificación de una línea de pintura electrostática, que actualmente solo aplica una capa de pintura, obtendrá la capacidad de aplicar dos capas de pintura de manera sistemática.

## **2. MARCO TEÓRICO**

Actualmente uno de los materiales mayormente utilizados en los vehículos es el acero, esto debido a su manejo accesible, propiedades de resistencia mecánica y precio, por lo que este material se utiliza tanto en chasis como en la carrocería.

La pintura requiere de una superficie limpia para tener adherencia, sin embargo, en la industria automotriz se utiliza recubrimientos de conversión con la finalidad de pasivar la superficie y mejorar la adherencia. El tratamiento previo más común es el Fosfato de zinc tri-catiónico, pero nuevos desarrollos base óxidos de zirconio están siendo implementados debido a que son más económicos, ambos los describiremos a continuación.

### **2.1. PREPARACIÓN DE ACERO PARA PINTAR**

#### **2.1.1. Fosfatizado**

Previo a realizar la aplicación de pintura se debe realizar preparación de la pieza, en el caso de los aceros el tratamiento es más que solo realizar limpieza en la superficie, recordemos que estamos evitando que el acero regrese a su estado natural de óxido de fierro y otros minerales. El fosfato de zinc no es considerado un recubrimiento de deposición, es considerado un recubrimiento de conversión, esta conversión se manifiesta en forma cristalina sobre la superficie tratada, esto sucede con una reacción química entre los iones metálicos que se encuentran disueltos en una mezcla de ácidos minerales y agua, los ácidos más comunes utilizados son el nítrico y el fosfórico.

Existen diferentes metales que se pueden disolver en estas soluciones como el zinc, níquel y manganeso, también es posible mezclar los tres en la solución, en este caso se llama tri catiónico. El metal en la solución depende del uso que se le vaya a dar al recubrimiento.

Ejemplo de tipos de fosfatos:

- 1.** Fosfatos de hierro: Muestran menor estabilidad anticorrosiva que otros, su bajo costo de aplicación representa buena opción para piezas a pintar que se encuentren dentro bajo techo, ya sea escritorios metálicos, mesas, sillas, lavadoras, etc. Además, genera menor cantidad de aguas residuales.
- 2.** Fosfatos de zinc: Son fosfatos de zinc regularmente mezclados con otros metales como Níquel y manganeso, incluyen refinadores de granos para proporcionar tamaños de cristal más pequeños. Este tipo de fosfato proporciona mayor resistencia a la corrosión y son utilizados en la industria automotriz y aeronáutica.
- 3.** Fosfatos de manganeso: Este recubrimiento de conversión proporciona resistencia al desgaste y lubricación a la pieza debido a la microestructura y morfología. (Li, 2021) Este recubrimiento es muy utilizado en piezas que tienen fricción como engranes y anillos de pistones.

Antes de realizar la reacción química de fosfato, es indispensable que el metal este activo, es decir, limpio, que no contenga contaminantes ya que esto podría generar áreas sin el recubrimiento cristalino.

Para explicar el funcionamiento, es conveniente citar el artículo de (Donofrio, 2000) Esta información se recibió mediante cursos de capacitación por la compañía en la que John Donofrio es el desarrollador de este proceso, adicional a la compartida durante su visita.

“Reacción de decapado. La primera reacción ocurre cuando la solución de fosfato de zinc tiene contacto con la superficie metálica (...), disuelve el metal de la superficie. (...) el grado de decapado esta entre 1-3g/m<sup>2</sup> de la superficie tratada, puede ser mayor para recubrimientos mayores. Durante la reacción de decapado, el ácido libre de la solución cerca de la superficie metálica es consumido por la disolución de la superficie metálica” (Donofrio, 2000).

“Reacción de recubrimiento. (...) El consumo del ácido libre en la interfaz del metal líquido, el pH incrementa y los metales catiónicos no pueden estar solubles en la solución. Ellos se reaccionan con el fosfato en la solución y deposita en la superficie metálica cristal de fosfato. “ (Donofrio, 2000).

“Reacción de lodos. El metal iónico ( $Fe^{+2}$ ) que se disolvió en la reacción de decapado es ionizado usando el acelerador (ejemplo, nitrito/nitrato, clorato, o peróxido) y se precipitara como lodo. (...). (Donofrio, 2000).

Como lo describe el artículo, los lodos generados en el proceso de fosfatizado son parte inherente, no se puede prescindir de este efecto por lo que un sistema de filtrado en el sistema es indispensable para extraer los lodos, la acumulación de estos lodos en el sistema genera problemas de bloqueos en la recirculación, en intercambio de calor, sistema de aspersion, reduce capacidad de solución en el tanque.

La cantidad de pasos necesarios para hacer el proceso de recubrimiento de conversión por fosfato depende del tipo de fosfato, requerimiento de o calidad de fosfato que se requiere y la capacidad financiera de la empresa que lo realiza. Para saber que la calidad del recubrimiento se cumple, es necesario un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM, Scanning Electron Microscope por sus siglas en inglés), con este equipo podemos visualizar el tamaño de cristal, la forma y la densidad de este, este tipo de equipos son costosos por lo que se recomienda generar controles de proceso y mantenimiento para asegurar el resultado. En la Figura 3 se aprecia la morfología de un recubrimiento de fosfato de zinc tomada mediante un microscopio electrónico de barrido. Los cristales en forma de hojuelas son característicos de un proceso de aplicación por aspersion, estos equipos tienen también la habilidad de medir el tamaño de cristal, hacer acercamientos para confirmar si existen huecos o alejamiento para asegurar la densidad, se puede determinar la composición del cristal si es requerido.



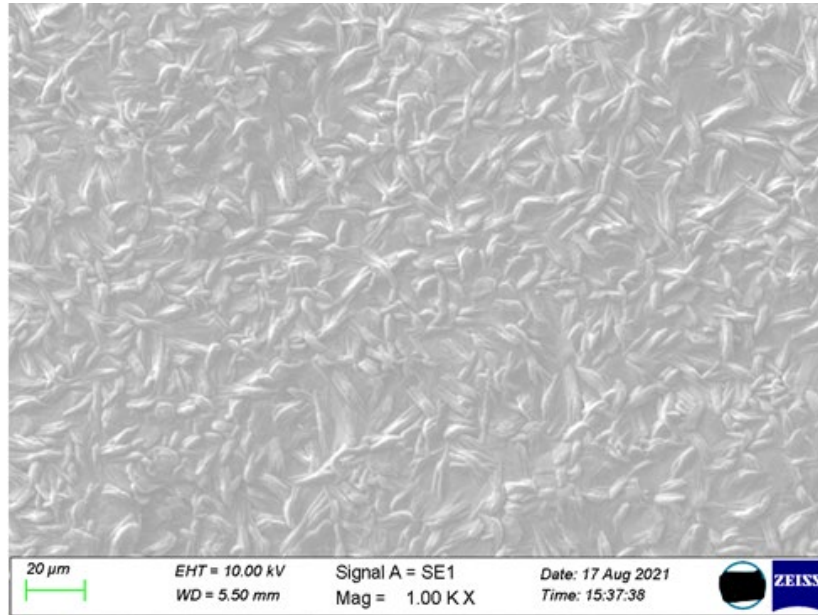


Figura 3 Imagen de superficie metálica con recubrimiento de fosfato de zinc.  
Elaboración propia

Una de las características importantes de evaluación de los recubrimientos orgánicos es la adherencia, de hecho, esta característica es básica en liberación de calidad de procesos de aplicación. La rugosidad de los cristales de fosfato son grandes promotores de adherencia entre la pintura y el sustrato, recordemos que el cristal no está depositado, sino, formado en el sustrato, de acuerdo con (Ivanova, 2021) "cuando se utilizan soluciones de fosfatación de zinc que contienen manganeso y níquel, la rugosidad de la superficie del recubrimiento disminuye, lo que aumenta la resistencia a la corrosión", el incremento de resistencia de corrosión se debe a que el recubrimiento está más cerrado cuando el cristal es más pequeño, una especie de filtro con mayor grado de filtración.

Otros tratamientos previos o pretratamiento se pueden referir a acciones mecánicas que se llevan a cabo a los materiales metálicos, estos tratamientos se realizan para eliminar contaminantes inorgánicos impregnados en el sustrato y que un proceso acuoso no tiene capacidad de remover, además de que sirve para remover rebabas y/o filos. Estos pueden ser:

- Tamboreado, se introduce las partes a tratar en un barril con piedras, el barril es girado para generar impactos y rozamiento en la superficie.
- Granallado, ataque constante de partículas de arena, acero, cerámicos e incluso cascara de nuez, aplicado con chorro de aire con la finalidad de desprender esos contaminantes.
- Cardado, cepillado con hilos de acero o plástico para remoción.
- Lijado, manual o con pulidora, se aplica diferentes tipos de lija dependiendo la rugosidad aceptada.

Algunos procesos de pintura se aplican sobre estos tratamientos mecánicos después de ser limpiados, aprovechan la rugosidad generada para el anclaje de pintura, sin embargo, su capacidad de resistencia corrosiva es muy baja. Si a estos tratamientos mecánicos se les agrega el recubrimiento de conversión su desempeño mejora, incluso el desempeño del recubrimiento de conversión mejora cuando existe estos tipos de tratamientos mecánicos, tal como lo muestra el estudio de (Chunyan, y otros, 2019) “(...)la rugosidad y uniformidad del revestimiento de conversión tienen una gran influencia en el comportamiento de adhesión y corrosión del revestimiento superior cuando se utiliza recubrimiento de conversión (...)”.

Antes de recubrir el cuerpo con fosfato, se realiza un proceso de exposición acuosa que “activa” la superficie. La activación deja sitios de nucleación para el crecimiento de cristales de fosfato que ocurre principalmente en paralelo a la superficie y alcanza un límite por contacto con el crecimiento de sitios de nucleación vecinos. Este proceso es muy importante para definir el tamaño de cristal y la densidad, de lo contrario huecos importantes y tamaños superiores a 20 micrómetros se van a reflejar en estudio SEM cuando es aplicado sobre acero. La activación sucede por partículas de titanio o incluso Zinc. Esta etapa también tiene de nombre acondicionador.

En algunos procesos de pretratamiento acuoso de fosfato se cuenta con un enjuague llamado sellador, este proceso agrega nanopartículas, su función

principal es disminuir la porosidad del recubrimiento, inicialmente este tipo de sellos eran de cromo (VI) pero la toxicidad de este producto hizo buscar alternativas, tales como el óxido de circonio o titanio. Nuevos desarrollos de recubrimientos de conversión están basados en esta etapa del proceso de pretratamiento.

### **2.1.2. Óxido de circonio**

Debido a que los sellos utilizados después de un proceso de conversión de fosfato debían bloquear huecos de cristales que tienen tamaños menores a los 10 micrómetros, estos debían tener tamaño en la escala de los nanómetros. (..) Con los beneficios / efectos de los cromatos, metales pesados y fosfatos, y luego avanzó hacia una discusión sobre los recubrimientos de conversión de óxido de circonio (o titanio). (Doerre, Hibbitts, Patrick, & Akafuah, 2018). Esto fue entre el año del 2000 al 2018.

“Mohammadzade y Ghanbari investigaron el proceso de recubrimiento con  $ZrO_2$  y concluyeron que la formación constaba de tres fases distintas comenzando con la precipitación, luego el crecimiento y, finalmente, un equilibrio dinámico autolimitante debido a la disminución de la reacción catódica.” (Doerre, Hibbitts, Patrick, & Akafuah, 2018) afirma también que debido a que su capa es tan delgada que las imperfecciones del metal se “trasmiten” aun con recubrimiento.

Finalmente concluye con importantes diferencias entre fosfatizado de zinc y el óxido de circonio.

- Reducción de lodos en 95% en óxido de circonio.
- El óxido de circonio trabaja en temperatura ambiente.
- El circonio tiene bajo nivel de toxicidad.
- Debido a baja generación de lodos, el costo de mantenimiento se ve reducido.
- Se eliminan etapas del proceso de pretratamiento ya que no requiere activado y sello.
- El óxido de circonio es mayormente utilizado en sustratos de aluminio.
- El uso de óxido de circonio reduce el costo de operación en 30%.

- No sacrifica el desempeño de corrosión y adherencia de pintura para metales no ferrosos en estudios realizados con la primera generación de recubrimientos basado de en oxido de circonio. (Milosev & Frankel, 2018).

En la Tabla 1 se enlista literatura acerca de cada uno de los recubrimientos previos que se pueden aplicar a los metales ya sean ferrosos o no ferrosos, el orden de esas tecnologías es también el orden de aparición en los mercados.

Tabla 1 Resumen del contenido de tres artículos de revisión destacados sobre tecnologías de recubrimientos previos a aplicación de pintura.

<b>Time</b>	<b>Author</b>	<b>Environmental</b>	<b>State of Art</b>	<b>Exceptional Topic</b>
1980	Bender et al.	Minimal	Phosphate	Film Formation
2005	Narayanan	Recovery	Tri-cationic	Film Analysis
2018	Milosev and Frankel	Remplace	ZrO <sub>2</sub>	Adhesion-Delamination

(Doerre, 2018)

El proceso de conversión de Oxido de Circonio igual que la conversión por fosfato tiene parámetros de control para asegurar la densidad de recubrimiento, tales como pH, tiempo de exposición, temperatura y agitación.

Debido a su tamaño no es posible determinar la calidad de recubrimiento como se realiza con fosfatizado, de acuerdo con (Milosev & Frankel, 2018)" Espectros XPS de bajo carbono sin tratar y tratados con H<sub>2</sub>ZrF<sub>6</sub>. El sustrato de acero reveló que el acero sin tratar estaba cubierto por Fe. Después de la formación de la capa a base de Zr, la intensidad de la señal de Fe disminuyó, pero todavía estaba presente, lo que indica que se incorporó Fe en el revestimiento de ZrO<sub>2</sub>."

En la Figura 4 se muestra el tipo de configuración de línea para un proceso de conversión de fosfato de zinc en comparación a un proceso de conversión base circonio/titanio, se aprecia como el proceso es más reducido, por lo que se espera una inversión para implementar esta parte de proceso en menos de 50 %. Sin embargo, por el momento es recomendable para sustratos de aluminio y no de acero, la segunda generación de esta nanotecnología está en evaluación, por lo

que habrá que esperar a convertir el proceso ambientalmente amigable y económico.

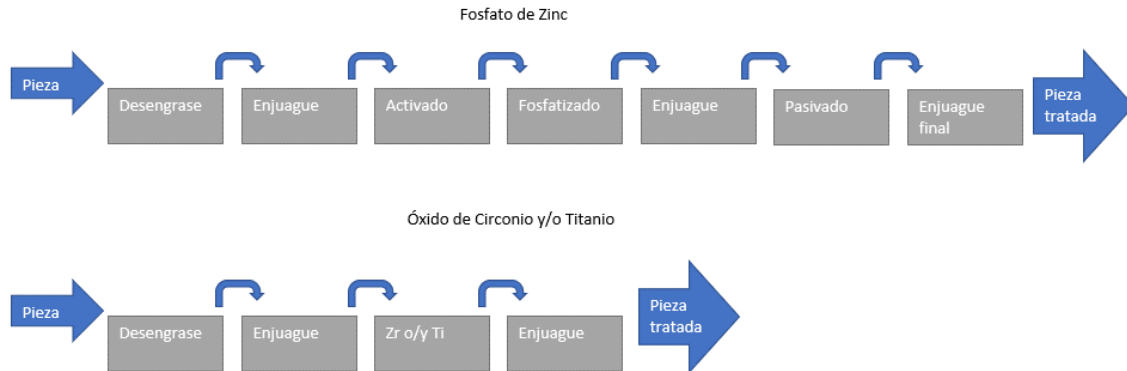


Figura 4 Ejemplo de configuración de proceso de recubrimiento por conversión.  
Elaboración propia

### 2.1.3. Funciones de las etapas de un proceso de conversión

Para la preparación de piezas a pintar en la industria automotriz y de vehículos pesados, el uso de un proceso de conversión es mandatorio por norma específica de cliente, en algunos casos aplica norma independiente propia, en otros casos se indica en la norma de pintura, raros casos donde aplica norma estándar internacional, esto se debe a experiencias propias de diseños y experiencias adquiridas. A continuación, en la Tabla 2, se presentan las especificaciones recopiladas de algunos de los principales fabricantes de vehículos.

Tabla 2 Resumen de normas en relación con recubrimientos de convención de OEM.

OEM	Norma	Título de norma	Comentario
Volvo Camiones	STD 5742,104	Phosphating Y 104	Norma específica de recubrimiento de conversión.
Toyota	TSH2105G	Spray - applied zinc phosphating agents.	Norma específica de recubrimiento de conversión. Existe otra para proceso de inmersión.
Hyundai / KIA	MS630-01_2020	Painting - metal products (Rust prevention)	Documento de pintura, indica proceso de fosfato en una página.
Mazda	MES MN 600.	No disponible	No disponible
Nissan	M0007 [2004]	Testing Method for Automotive Paint	Introduce comentario sobre acuerdo entre partes en recubrimiento de conversión.
Renault	47 - 01 -000 / E	Protection against corrosive attack of the metal parts assemblies fitted together on the vehicle on assembly.	Proporciona opciones, entre ellas fosfatizado.
VW / AUDI	TL 240	Thin-layer zinc phosphate	Norma específica de Fosfato
BMW	DIN EN 12476	Phosphate conversion coatings of metals - Method of specifying requirement	Norma internacional específica de fosfatizado
Daimler	DBL 7381_2021	Organic coating for metallic parts on the outer side and underside of the vehicle and in the engine compartment.	Indica revisión de fosfato a dos tipos de aumentos.
Honda	5100Z-TR0-6000	Quality Standard of Painting for Chassis Related Parts of Automobiles	Proporciona ejemplos de aplicación de fosfato de zinc.
Ford	WSS-M3P36-A1	Phosphate coating	Norma específica de aplicación de fosfato de Ford
GM	9984303	Phosphate Coating Final Sealant (Passivation) Rinse For Small Parts	Norma de fosfatizado

Elaboración propia

El proceso de recubrimiento por conversión de fosfato de zinc tri-catiónico consta de dos etapas en el proceso de pretratamiento, este proceso no se podría dar sin las demás etapas, por lo que se procede a definir las.

#### **2.1.4. Etapas requeridas en proceso de conversión de fosfato de zinc**

**Desengrase.** Es la etapa de eliminación de residuos orgánicos de la superficie del metal, así como inorgánicos solo si estos están sobrepuestos. Para esto requiere o es recomendable las siguientes características:

1. Fusión – El detergente utiliza temperatura para cambiar la consistencia física de las partículas insolubles en agua para ayudar a removerlas físicamente.
2. Disolver – Utilizar la reactividad química del limpiador para solubilizar las suciedades. (Es más apropiado con suciedades que pueden reaccionar con alcalinos o ácidos) Las grasas son saponificadas por alcalinos (formando jabón).
3. Remover – Utilizar la fuerza física (agitación-aspersión) para remover las partículas de un sustrato.

**Enjuague.** Esta etapa se encuentra entre procesos que contienen algún tipo de químicos, su objetivo es:

1. Detener la reacción química de la etapa anterior.
2. El agua de enjuague elimina cualquier residuo de aceites, partículas, sólidos y de los productos químicos remanentes de la superficie del metal.
3. El enjuague también elimina las sales solubles, (productos de reacción) y quelantes orgánicos, secuestrantes y tensioactivos de la superficie del metal.

**Decapado.** Esta etapa es un extra en los procesos de conversión, ya que solo se implementan en las líneas que procesan productos con soldadura, se utilizan en estos para limpiar el área afectada por la soldadura, ya que en estas zonas no se puede formar los cristales de fosfato.

**Activado o refinado.** Es la primera parte de la etapa de fosfato, ya que esta etapa crea sitios de nucleación en el metal, esta etapa es fundamental para desarrollar el tamaño y la densidad de cristales.

**Pasivado o sellado.** Este proceso deposita nanopartículas en los poros que se encuentra en los cristales de fosfato. Algunos proveedores de químicos para procesos de conversión omiten este paso argumentando que el cristal es suficientemente pequeño y no es necesario.

**Enjuague final o enjuague con agua desionizada (DI).** En esta etapa se elimina cualquier residuo de contaminantes. Es muy importante que la conductividad del agua de proceso sea menor a  $15 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

Finalmente, hay que recalcar que estos procesos acuosos como todos los procesos deben contemplar un plan de mantenimiento preventivo, el acabado final de recubrimiento de conversión depende del contacto con la pieza, un buen control de proceso con un sistema de aspersion/ inmersión defectuosa no es funcional.

### **Aplicación de pintura**

La corrosión en los vehículos se presenta de manera diferente según donde opera el vehículo, uno de los medios más agresivos son lugares donde utilizan el cloruro de sodio y cloruro de potasio en las carreteras donde suele nevar o en zonas costeras cercanas a mares y océanos. Estas sales generan en la aguanieve o humedad ambiental una mayor conductividad fomentando la pérdida de electrones en el acero, es decir, oxidando el metal.

Para inhibir la corrosión se utiliza recubrimiento, en específico pintura. En la Figura 5 se muestra como la carrocería se monta sobre el chasis, lo que evita que el chasis se exponga a el ataque por intemperismo además de que el aspecto visual no es requerido porque no está en zona de vista.



La carrocería de un vehículo de pasajeros debe cumplir:

1. Resistencia corrosiva.
2. Resistencia al intemperismo.
3. Buen aspecto visual.

El Chasis de un vehículo de pasajeros debe cumplir:

1. Características visuales.



Figura 5 Imagen de un vehículo partido.  
(Ingemecanica.com, 2021)

La industria de vehículos pesados está basada bajo similares criterios de protección y aspectos visuales, sin embargo, como se muestra en la Figura 6 la carrocería no cubre completamente el chasis, por lo tanto, el chasis debe tener protección adicional en comparación a un chasis de un vehículo de pasajeros, sin embargo, no requiere buen aspecto visual.

La carrocería de un vehículo pesado debe cumplir:

- a. Resistencia corrosiva.
- b. Resistencia al intemperismo.
- c. Buen aspecto visual.

El chasis de un vehículo pesado debe cumplir:

1. Características visuales.
2. Resistencia al intemperismo.



Figura 6 Carrocería y chasis de vehículos pesados.  
(Volvo, 2021)

Las pinturas se diseñan para diversos métodos de aplicación, para secado rápido por medio de hornos, así como aspectos económicos, ecológicos y de salud. En la siguiente Tabla 3 se muestran propiedades que debe cumplir las pinturas de acuerdo con (Giudice, 2009) y cuales deberá cubrir las zonas antes descritas.

Tabla 3 Propiedades generales de la pintura, las columnas muestran Check Box donde aplica las pruebas.

Propiedad	Descripción	Carrocería	Chasis de vehículo de pasajeros	Chasis de vehículo de carga
Resistencia al agua	Capacidad de absorción de agua baja	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Resistencia a vapor de agua	Resistencia al agua en forma molecular	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Resistencia a paso de iones	Evitar procesos difusionales conducentes a la penetración de iones de cloruro, sulfato, carbonato.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Resistencia a fenómenos osmóticos	Agua a elevadas presiones. Específico en barcos.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Resistencia a la intemperie	Degradación de material polimérico por la acción UV de la luz solar	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Resistencia a agentes químicos.	Rompimiento o degradación por soluciones de solventes acidas o alcalinas	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Adherencia en seco y en húmedo.	Fuerza de adherencia, sobre toda en condiciones húmedas.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Resistencia a la abrasión.	Frotamiento con otros objetos o soluciones.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Elasticidad	Contracción o expansión del sustrato, si requiere dobles, se aplica estructuras poliméricas de alta elasticidad para resortes o muelles.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Algunos componentes	<input checked="" type="checkbox"/> Algunos componentes
Resistencia a bacterias y hongos	Microorganismos que se desarrollan sobre base líquida tomando nutrientes de algunos componentes.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Elaboración propia

## **Métodos de aplicación de pintura**

En la industria automotriz existen tres métodos de aplicación de pintura, cada uno de ellos tiene sus ventajas y desventajas, sin embargo, existe la posibilidad de mezclar estos métodos para utilizar las ventajas de un recubrimiento de tal modo que se cubre la desventaja de otro y cumplir diferentes requerimientos. El primero es el método de aplicación por electrodeposición conocido como E-coat, ELPO, KTL, etc.; el segundo es el método de aplicación líquida, puede ser electrostática o no y el tercero es el método de aplicación en polvo o "powder coating", con aplicación con electrostática. A continuación, describimos cada uno y realizaremos un comparativo entre ellos.

### **Método de aplicación por E-Coat**

Existen dos procesos de pintura con los que se han trabajado en la empresa y que puedo describir por experiencia, uno de ellos es el E-coat, en la compañía se denomina como KTL (Kathodische Tauch-Lackierung por sus siglas en alemán y que se traduce como: Pintura por inmersión catódica). Conocida con nombres como electrodeposición o cataforética debido a la dependencia de una carga de energía en el proceso y las partes adquieren la capa de pintura fungiendo como el cátodo.

La electrodeposición es un proceso de aplicación de pintura por inmersión, este proceso lo utiliza la mayoría de los fabricantes automotrices, el e-coat es el primer recubrimiento utilizado después de tratamiento previo de fosfato de zinc, esto debido a que no es posible utilizarlo sobre un recubrimiento no conductivo, es decir, se podría aplicar sobre un metal con recubrimiento de aleación de zinc, pero no sobre un recubrimiento orgánico. Aunque en la preparación de pintura contiene solvente, se considera pintura base agua por su porcentaje en la composición como lo muestra la Figura 7, el porcentaje puede haber una variación de acuerdo con el fabricante de los componentes.

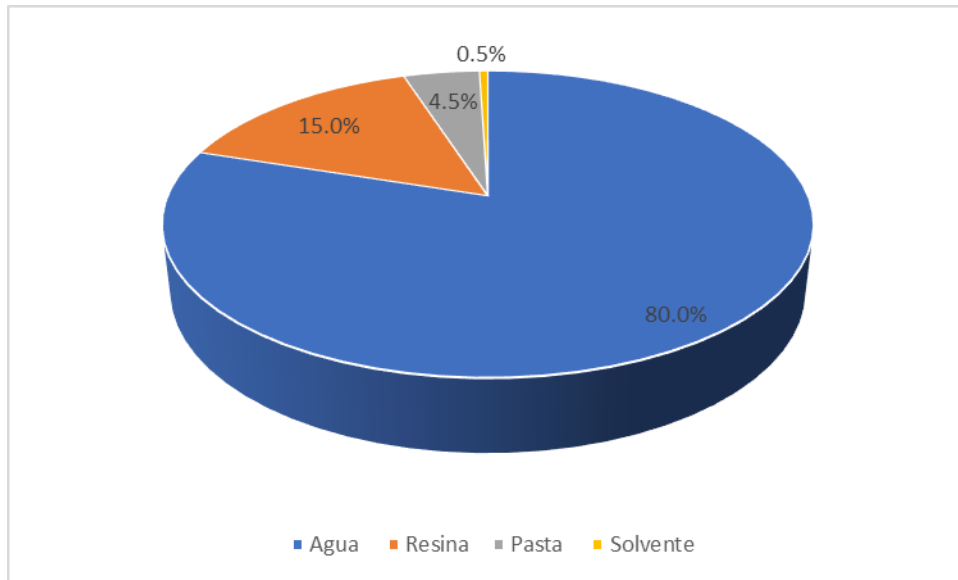


Figura 7 Composición de pintura por electrodeposición.  
Elaboración propia

Ventajas:

- Recubrimiento es constante en su superficie general, excluyendo cavidades.
- Entre 95% y 99% de los componentes de pintura es utilizado, la pérdida se reduce debido a que los enjuagues UF sirven de recuperadores de sólidos que son arrastrados en las piezas.
- Alto volumen de pintado.
- Sistema de automatizado puede ser alto.
- Por ser inmersión, se cubre toda la superficie, en caso de querer omitir alguna zona de pintura, se puede enmascarar.
- Puede recibir capa de pintura superior para mejorar características de resistencia.
- Por ser mayormente agua, el riesgo de flamabilidad se reduce y no hay compuestos volátiles.

Desventajas:

- El horneado es de alta temperatura  $>180^{\circ}\text{C}$ , por lo que componentes compuestos que no toleren esa temperatura deberán ser ensamblados después de pintar.

- Al ser inmersión, se requiere una solución preparada con recipiente al menos el doble de tamaño.
- Alta inversión.
- Requiere planta de energía de emergencia, ya que, si detiene la recirculación, los componentes se precipitan y ya no se recupera.
- No se puede hacer cambio de color, se tendría que drenar todo el proceso.
- No puede generar colores metálicos, los pigmentos generan colores semi brillosos.

El equipo de aplicación de pintura requiere de equipos periféricos para hacer la deposición Figura 8. Estos son necesarios para mantener los parámetros de operaciones óptimos.

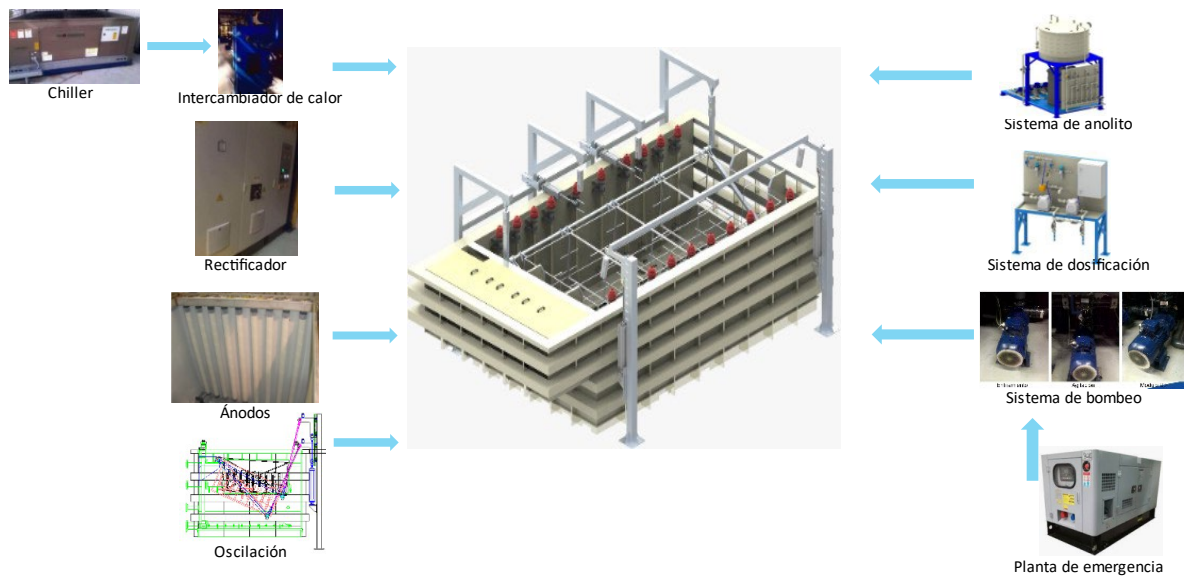


Figura 8 Partes de etapa de aplicación de pintura por electrodeposición.  
Elaboración propia

- Ánodo: Electrodo cargado positivamente (celda/tubo de acero inoxidable), conectado al rectificador.
- Cátodo: Electrodo cargado negativamente (pieza a pintar).
- Rectificador: Equipo que convierte la corriente alterna en directa.

- Celda de diálisis o anolito: Es un sistema de control de ácido en el baño, consta de recirculación de agua DI circulando a través de los ánodos, los cuales mediante un cuerpo plástico (no conductivo) separa la pintura por una membrana semipermeable que permite pasar el neutralizador, pero no a la pintura.
- Intercambiador: Es un sistema de control de temperatura, mediante un chiller circula agua temperada para hacer intercambio de calor con la pintura.
- Sistema de dosificación: Mediante la resultante de corriente que continuamente mide el equipo envía una señal al sistema de dosificación, la señal y un valor programado da resultado a una cantidad de “golpes” de bomba neumática.
- Sistema de oscilación: Este sistema permite la liberación y/o reubicación de burbujas de aire que puedan quedar atrapadas en las piezas.
- Sistema de bombeo: La pintura preparada requiere de constante agitación para evitar la precipitación de los sólidos, se cuenta con 3 bombas, recirculación, ultrafiltración y enfriamiento. Se cuenta con planta de emergencia debido al daño causado por falta de agitación.

Al aplicar voltaje una corriente eléctrica polariza los electrodos para atraer las partículas (electroforesis) que están suspendidas en la solución líquida y depositarlas en la superficie del sustrato. La electrodeposición continúa hasta que se alcanza el nivel deseado de espesor de recubrimiento (Bernal, 2018).

Notas:

- Sin corriente eléctrica no hay atracción de las resinas, esto obliga que solo se pinten piezas metálicas.
- Mayor voltaje genera mayor excitación de resina y se genera mayor espesor.
- Llega un punto donde la pintura funciona de aislamiento.

Las resinas con ayuda del ácido se encuentran en disolución dentro del baño, al aplicar voltaje las resinas son atraídas hacia el cátodo, tal y como se muestra en la

Figura 9, al liberar el ácido se coagulan, esa coagulación se manifiesta en forma de recubrimiento. El ácido liberado debe ser extraído de la tina mediante el anolito, de lo contrario las piezas se van a despintar por alta acidez acumulada en la tina.

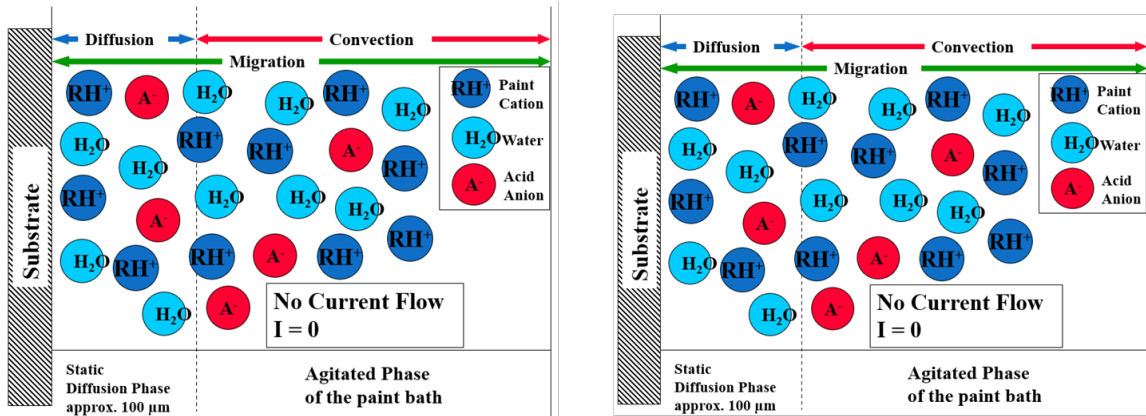


Figura 9 Representación de los componentes de pintura en el en la tina, Izquierda: sin corriente aplicada, Derecha con corriente aplicada. (Axalta 2014)

Este tipo de proceso puede ser monocapa o pintura primaria para otras capas y tiene altas capacidades de resistencia corrosiva.

### Método de aplicación por electrostática líquida

La cantidad de electrones que tiene un núcleo define el tipo de carga que se cuenta, es decir, cuando un núcleo gana electrones se dice que tiene carga negativa, cuando el núcleo pierde electrones entonces tiene carga positiva. Por ejemplo, al frotar un globo sobre una manta, el globo gana electrones y la manta pierde electrones. En la Figura 10 se representa como un globo cargado puede cambiar la trayectoria de una corriente de agua por el diferencial de carga.



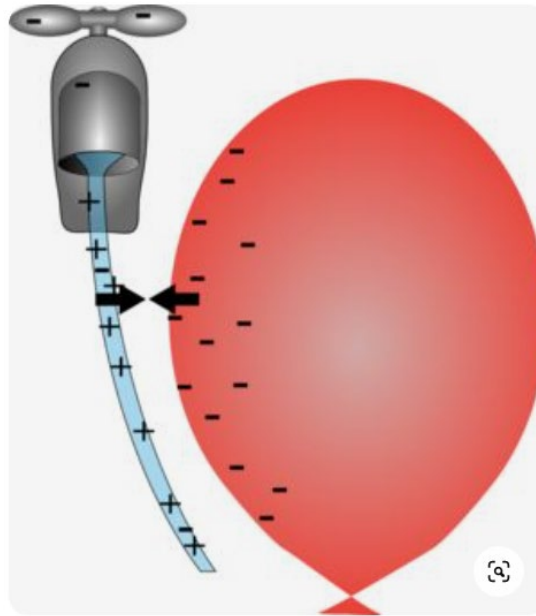


Figura 10 Atracción estática.  
(pinterest.com, 2021)

Cuando un flujo de partículas pasa a través de una zona ionizada, algunos iones serán depositados sobre las superficies de las partículas (...). La cantidad de iones depositados en la partícula depende del tiempo de residencia, el radio de la partícula y la forma (Chang, 1995).

La industria automotriz, hace uso de estos principios para hacer los procesos de pintura eficientes, los equipos de aplicación pueden configurarse de dos formas, ya sea ionizando la zona de bombeo de pintura o ionizando la salida de pintura.

La pulverización de la pintura se genera mediante limitación de salida de flujo de pintura, presión de aire o fuerza centrífuga, los equipos más comunes son pistola, disco y campana.

Los objetos que se van a pintar deben estar conectados a tierra, de tal modo que la ionización de las partículas busque donde descargarse, teniendo cargas opuestas entre el objeto a pintar y la pintura, se genera una atracción, una deposición de pintura líquida sobre el metal. La cantidad de pintura depositada

depende de flujo de pintura, tiempo de exposición y contenido de solidos de pintura.

Regularmente la eficiencia del uso de pintura se determina mediante la cantidad de pintura depositada contra la cantidad de pintura utilizada y se representa de la siguiente manera:

$$Eficiencia\ de\ uso = \frac{Pintura\ depositada}{Pintura\ utilizada}$$

Sin embargo, esto no es cierto para programas de sistemas de producción (Production System), esto es debido a que en estos cálculos no se agregan información de purga de tuberías, remanentes de tambos, pruebas de boquillas o aspersion, incluso, excesos de deposición de pintura contra una capa estándar.

Toda (Toda, Salazr, & Saito, 2013) replantea la fórmula de la siguiente manera:

$$Eficiencia\ de\ uso = \frac{Pintura\ requerida\ para\ espesor\ OK}{Pintura\ comprada}$$

“Manifiesta que, utilizando esta fórmula, la eficiencia de uso de pintura es menor al 40% y menos de 10 % para piezas pequeñas”.

Esta información contrapone a otro estudio realizado por (Leitz, 2007) donde asegura que la “transferencia es entre 80 % y 85 %” Como se muestra en la Tabla 4, para pinturas liquidas la eficiencia de transferencia en pinturas base agua y pinturas base solvente.

Tabla 4 Comparativo de espesor de pintura y eficiencia de transferencia para 3 tipos de métodos de aplicación de pintura primaria.

<b>Method</b>	<b>Film Thickness (mil)</b>	<b>Solids Content</b>	<b>Transfer Efficiency</b>
Solventborne	1	65%	80%
Waterborne	0.8	30%	85%
Powder	2.5	N/A	95%

(W. Leitz, 2007)

Utilizando la siguiente formula:

$$\text{Líquido usado} = \frac{\text{Espesor de pintura} * \text{area superficial}}{\frac{\text{Porcentaje de transferencia}}{\text{Contenido de solidos}}}$$

Es evidente que no se está considerando mermas de proceso y espesores excedidos, es buena referencia para procesos continuos de alta eficiencia. Para otras tecnologías como ERBS campanas rotatorias de aspersion electrostática por sus siglas en inglés, se estima una eficiencia de uso de 90% contra un 40% de pistolas de aspersion neumáticas (Reza, 2019).

La pintura no utilizada ya no puede ser reincorporada al sistema como lo es en procesos de pintura por E-Coat mediante UF y procesos de pintura en polvo por recuperación de polvos.

El uso de electrostática en la aplicación de pintura líquida genera beneficios de aprovechamiento de material, procesos como E-Coat y polvo no pueden generar colores que provee la pintura líquida electrostática. (Schulz, 2013) asegura que "(...) los niveles de eficiencia son mayores al 90 %. (...) el uso de robots permite mayor reproducibilidad en resultados de pintura y baja de desperdicio".

La gran gama de colores y brillos que se utilizan en las carrocerías de los vehículos solo pueden aplicarse por medio de pintura por aspersion, así que, el uso de electrostática es financieramente vital para las compañías.

Ventajas

- Se puede realizar con procesos automáticos, manuales o semi automáticos. Depende de la pieza que se va a pintar.
- Mejora en 90 % la eficiencia en relación de aplicación sin electrostática.
- La temperatura de curado de pintura es de 100°C, la mitad de un proceso de E-Coat o pintura en polvo.
- Debido a su temperatura de curado, es posible pintar piezas con preensambles sin degradación.

#### Desventajas

- Eficiencia de transición de ~50 % dependiendo de equipo de aplicación.
- Variación de espesores con equipos manuales o semi automáticos.
- No se puede reutilizar pintura mezclada.
- Debe tener un tiempo de espera antes de ingresar al horno para liberar disolventes y por motivos de apariencia.

#### **Método de aplicación por electrostática en polvo**

De acuerdo con (Rustico Jr, Matias, & Grepo, 2015) "este proceso inicio en los años de 1950 como aislante eléctrico" pero no hasta los años de 1980 cuando se empezó a utilizar en la industria automotriz en autopartes, y en algunas carrocerías, debido a que no puede proporcionar colores metálicos, se limita en autopartes y zonas decorativas.

Este proceso tiene similitudes de aplicación con la aplicación electrostática líquida, se ioniza los polvos antes de ser aplicada para ser atraídos a la pieza que se va a pintar, pero también se pueda aplicar por inmersión en una cama de polvos. Debido a que el material se aplica en sólido, no se requiere diluyentes como solventes, los polvos que no se hayan adherido a la pieza, se pueden reutilizar, estos puntos lo vuelven ambientalmente amigable. La pasta y la resina se encuentra dentro del material, en su estado sólido el material no se cataliza, requiere de horneado para derretir los componentes sobre la pieza y solo entonces se formará el recubrimiento solidificado, tal y como se muestra en la Figura 11.

“Hay dos grupos de procesos de recubrimiento en fase polvo. El método más utilizado para un sistema termoplástico es el proceso de lecho fluidizado. Aquí, una pieza de prueba de metal caliente se sumerge en polvo fluidizado. Otro proceso para productos termoendurecibles (Thermosetting) se utiliza predominantemente con polvos de recubrimiento que se aplican mediante procesos electrostáticos.” (Tekeshita, Sawada, Takao, & Watanuki, 2012).

Desventaja en este tipo de procesos es la temperatura de curado que ronda entre 180 °C y 200 °C tanto para termoplásticos como para termo endurecible asegura (Zhongyan, y otros, 2016) “Los países están comprometidos con el desarrollo de recubrimientos en polvo curables a baja temperatura o temperatura ambiente.”

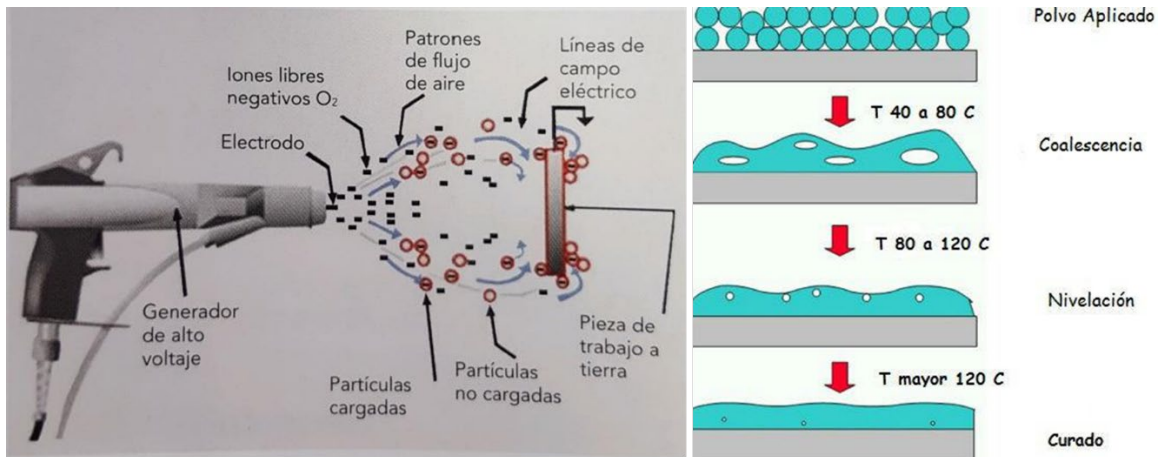


Figura 11 Esquema de aplicación de pintura por electrostática a la izquierda, derretimiento de las partículas en el horno a la derecha (Zonadepinturas.com 2021)

### Ventajas

- Su eficiencia de transferencia llega hasta 98 %, debido a que el polvo no aplicado se puede reutilizar.
- No requiere preparación o mezcla, se utiliza conforme fue adquirido.
- Puede automatizar el proceso a uso de robots o puede ser manual.
- No se utiliza solventes, por lo que no emite VOC's, además de no ser flamable.
- No requiere condiciones especiales de almacenaje en materias primas.

- Espesores altos si es requerido.
- Propiedades mecánicas y resistencia a la abrasión.

#### Desventajas

- El cambio de color es complicado debido a que se debe remover residuos de color anterior y cambio de filtros para poder recuperar polvos.
- Acabados con rugosidad, aun curado por lo que no se recomienda en carrocerías.
- No genera colores metálicos.
- Temperatura de curado alta, por lo que se tiene que evitar pintar preensambles con piezas delicadas.

#### **Tipos de pintura automotriz**

La ingeniería de superficies se divide en tres grupos.

- 1) El primer grupo consta de procesos que modifican la superficie existente de alguna manera, como el endurecimiento por transformación y la fusión de la superficie.
- 2) El segundo grupo consiste en procesos que modifican la superficie existente de alguna manera con un cambio en la composición de la capa superficial (agregando algún elemento).
- 3) El tercer grupo consiste en procesos que aplican un material a la superficie y generalmente se conocen como procesos de recubrimiento. Aquí, la capa de ingeniería de la superficie se aplica a la superficie (en lugar de ser una modificación del material original) y, en consecuencia, la gama de métodos y materiales potenciales es enorme. En esta rama se encuentra la pintura, deposición por aspersion térmica y revestimiento de soldadura dura.

Los procesos de pintura están dentro de una rama de la ingeniería que se llama Ingeniería de superficies, es decir, cuando el recubrimiento se aplica en estado líquido se solidifica mediante una reacción química y evaporación del medio de transporte líquido comúnmente llamado vehículo o el recubrimiento de aplicación en estado sólido se funde mediante el equipo de aplicación y/o impacto y se

solidifica otra vez mediante la pérdida de temperatura. "Los componentes fundamentales de una pintura son el material formador de película (también llamado aglutinante o ligante), los pigmentos, los aditivos y eventualmente la mezcla solvente (disolvente y diluyente)" (Pereyra, 2009).

La pintura es el método de deposición anticorrosivo más práctico y económico para los requerimientos de la industria automotriz, su tiempo de aplicación y costo en relación con otros (cold spray o thermal spray) es sustancial. El recubrimiento de pintura es de bajo espesor, para incrementarlo es necesario hacerlo mediante pre-secados o secados de pintura.

### **Pinturas anticorrosivas**

Estas composiciones tienen como función fundamental controlar el fenómeno de corrosión para prolongar la vida útil del sustrato. Una propiedad esencial es la adhesión al metal, la cual es función del material formador de película; su naturaleza depende de la pintura intermedia o de terminación seleccionada según las exigencias del medio ambiente.

Las principales características de las pinturas anticorrosivas son el bajo brillo para facilitar la adhesión de la capa posterior; la reducida permeabilidad para controlar el proceso de corrosión y evitar simultáneamente la formación de ampollas; óptima adhesión al sustrato de base y finalmente una elevada eficiencia del pigmento inhibidor de la corrosión, particularmente los solubles ya que requieren el medio electrolítico para desarrollar su mecanismo de acción.

### **Pinturas intermedias**

Estos productos se incluyen en un sistema protector para mejorar la adhesión de la pintura de terminación (sistemas heterogéneos) o bien para reducir sensiblemente la permeabilidad de la película seca (controlar el acceso del medio electrolítico y sustancias agresivas a la interfase sustrato / recubrimiento). Estas pinturas en sistemas heterogéneos son generalmente de tipo convencional (espesor de película seca de 25/30  $\mu\text{m}$  por capa) mientras que las selladoras (tipo alto espesor

o "high build", 100/150  $\mu\text{m}$  por capa) están basadas en pigmentos laminares (mica, óxido de hierro micáceo, etc.).

### **Pinturas de terminación**

La película de esta pintura protege las capas del primer, de la anticorrosiva o de la intermedia del medio externo; se pueden diseñar con materiales formadores de película de diferente naturaleza química. Se formulan en general con bajos niveles de pigmentos y cargas o extendedores con el fin de generar una película brillante para facilitar su limpieza y de mínima permeabilidad para evitar el acceso de sustancias agresivas (Giudice, 2009).

Esta última es la primera línea de defensa, ya que la degradación de la pintura por exposición de combinación de la radiación solar /humedad /temperatura.

### **Pintura primaria o imprimación**

En la industria automotriz no se puede prescindir de esta aplicación ya sea por electrostática o por inmersión, en las carrocerías es utilizado también como relleno y siempre va aplicado sobre el sustrato, este recubrimiento es el principal protector contra la corrosión y promotor de adherencia las capas subsecuentes.

Primario epóxico se considera una buena base estándar cuando se trata de garantizar que la pintura para automóviles se adhiera al metal y promueva un acabado de pintura de calidad. Está formulado específicamente para prevenir la corrosión.

Primario de superficie de uretano: este tipo de recubrimiento de superficie se aplica sobre un primario o sobre sustrato no corrosivo como polímeros, ya que no proporciona la mejor resistencia a la corrosión.

Primario de poliéster: tiene lo que se conoce en el mundo del automóvil como una excelente "construcción", rellena pequeños arañazos y abolladuras como lo haría una masilla o un relleno y tiene la capacidad de relleno más alta de cualquier



imprimación pulverizable. Esto lo hace perfecto para rellenar imperfecciones de la carrocería Y para lograr una buena superficie de unión de pintura al mismo tiempo. Sin embargo, tiende a ser un poco más quebradizo y propenso a agrietarse que el uretano o el epóxico una vez secos, por lo que es un excelente primario para pequeños trabajos de reparación y relleno, pero puede que no sea la mejor opción para un automóvil completo.

Sellador de uretano: este tipo de primario se usa mejor simplemente como una capa adhesiva fuerte para que la pintura se adhiera. El sellador de uretano no tiene realmente ninguna capacidad de relleno, pero es perfecto para cuando estás pintando un vehículo que ya está en buenas condiciones o necesitas sellar una buena cantidad de relleno o carrocería.

Primario de grabado ácido: se parece mucho al aparejo de uretano en el sentido de que su fuerte no es tanto la prevención de la corrosión como el proporcionar una superficie de unión fuerte para la pintura. Si el objetivo es prevenir la oxidación adicional, use un imprimador de grabado ácido junto con un sellador o un preventivo de la oxidación. Este tipo de imprimación se seca mucho más rápido que los demás, por lo que se utiliza en muchas reparaciones de carrocería en talleres de automóviles para acelerar el tiempo de reparación. También elimina la necesidad de cualquier acondicionador de metales, por lo que es mejor cuando se aplica directamente sobre el metal desnudo y luego se cubre con una imprimación secundaria, como epóxico o uretano.

Primario de esmalte: son extremadamente económicos y, al igual que el epóxico, proporcionan una buena base para que se adhiera la pintura de automóviles. Tienen un nivel de resistencia a la corrosión de regular a bueno.

Primario de laca: se seca rápidamente y se lija bastante bien, pero puede provocar grietas y burbujas a largo plazo, por lo que estos tipos de imprimación de pintura para automóviles se utilizan mejor debajo de una capa de pintura y prevención de la corrosión para trabajos de carrocería pequeños.

Primario de uretano de curado por humedad: es excelente tanto para la adhesión de pintura como para la protección contra el óxido en trabajos de reparación difíciles donde no se puede obtener una eliminación completa del óxido, lo que lo convierte en una excelente opción de imprimación general para completar dos trabajos a la vez. También cura rápidamente cuando se expone a la humedad de la atmósfera, por lo que los tiempos de curado se reducen aproximadamente a la mitad.

### **Pintura superior**

El recubrimiento o pintura superior, como su nombre lo dice, es la capa que va expuesta al ambiente, además de proporcionar una apariencia, debe soportar el ambiente. La pintura de uretano para automóviles es generalmente la opción de pintura para autos más duradera que existe. Es altamente resistente al astillado y puede resistir la decoloración durante 10 años aproximadamente. Este tipo de pintura se seca rápidamente y no tiende a correrse como las pinturas de esmalte. Debido a su mayor calidad, la pintura de uretano es menos asequible que la pintura de esmalte.

“Debido a las excelentes propiedades de aislamiento, buena resistencia química, bajo costo, buena tenacidad y flexibilidad, buena procesabilidad, permeabilidad a la humedad razonablemente baja y sin olor ni toxicidad, se usa ampliamente.” (Begum, Rane, & Kanny, 2020).

La pintura de esmalte acrílico dura mucho tiempo, ya que crea una carcasa. Existen dos tipos de pinturas de esmalte: de una etapa y de dos etapas. Esencialmente, las pinturas de esmalte de una etapa tienen la capa base y la capa transparente mezcladas, de modo que solo tiene que aplicar una sola capa de pintura. Por otra parte, el esmalte de dos etapas requiere que la capa base y la capa transparente se apliquen por separado.

La laca fue el primer tipo de pintura para automóviles y fue la única opción durante varios años. Las ventajas de esta pintura es que es fácil de aplicar y tiene un alto

brillo. La desventaja es que esta pintura se desvanece con rapidez, especialmente cuando está expuesta a los rayos UV.

Uretano acrílico dura mucho tiempo como el esmalte y es fácil de aplicar como la laca. La única dificultad con este tipo de pintura es que contiene un catalizador para que se seque rápidamente, por lo que debe usarse tan pronto como se mezcle.

### Tipos de recubrimientos, características

Existe muchos tipos de pinturas para diferentes aplicaciones, es importante identificar las necesidades del producto y proceso, así como sus limitaciones. Apegarse a lo que actualmente se cuenta y no hacer el proceso más complejo.

Para este proyecto se considera un producto que es parte de la suspensión del vehículo, no tiene requerimiento de vista como las puertas, el cofre o cajuela. Entonces, el relleno o (filler, en inglés) es una capa que no se considera, las imperfecciones del sustrato no son evaluados, la capa de pintura transparente no es necesaria si el recubrimiento base tiene capacidad de protección a la irradiación solar. De tal modo que la estructura de las capas de recubrimiento se representaría de acuerdo con la Figura 12.

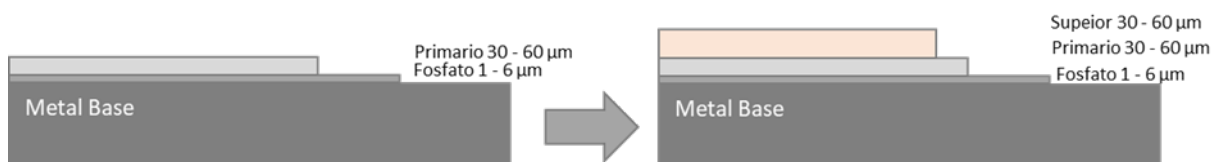


Figura 12 Izquierdo, simulación de corte seccional con una capa de pintura, derecha: simulación de corte seccional con dos capas de pintura.

Elaboración propia

## 2.2. PRUEBAS DE DESEMPEÑO DE RECUBRIMIENTO

### Requerimiento que debe cubrir el recubrimiento

Para la elección de materiales es importante tener definido las condiciones que se va a exponer, así como el criterio de aceptación que se va a aplicar. En una empresa que se dedica al suministro de partes de diversos OEM se debe considerar que los requerimientos son específicos por cliente, por lo que se debe buscar someter las partes a la prueba o pruebas más rigurosas, independientemente que al final, todas las especificaciones tengan que ser cumplidas.

Las pruebas de evaluación de pintura se definen en cuatro grupos, algunas son no destructivas, la mayoría son destructivas:

- 1) **Pruebas de corrosión**, este tipo de pruebas son de envejecimiento acelerado, se busca exponer el producto a condiciones en las que se puede exponer en campo y determina la capacidad del recubrimiento para proteger contra la corrosión. Las pruebas más comunes son cámara salina simple, cámara de corrosión compuesta, inmersión en agua, cámara de humedad, etc. Los periodos de exposición son largos, pueden ser de 24 horas hasta 10 semanas, no existe una relación directa que determine el tiempo de exposición con el tiempo en campo.
- 2) **Resistencia química**, debido a que ciertos componentes se encuentran dentro del cofre o capo, estos están expuestos a algún fluido utilizado en el motor, sus exposiciones en las pruebas suelen ser periodos cortos de tiempo entre 7 horas y 24 horas. Las pruebas más comunes son resistencia al ácido de batería, resistencia al aceite, resistencia a la gasolina, resistencia al diésel, etc.
- 3) **Resistencia mecánica**, este tipo de pruebas determinan la capacidad física del recubrimiento, las más usuales son: dureza, adherencia, resistencia a la grava, resistencia al impacto, resistencia a agua a presión, dobléz o flexibilidad.
- 4) **Resistencia ambiental**, estas pruebas se someten principalmente a aquellas que son más expuestas al ambiente, sobre todo a la irradiación solar y puede estar mezclada con condiciones climáticas como humedad, hay principalmente dos tipos de pruebas, exposición a la irradiación UV y exposición a irradiación Xenón, aunque hay pruebas que no requieren un

equipo de pruebas, puede ser expuesto al ambiente. Estas pruebas en equipos pueden llegar a durar de 700 horas hasta 3000 horas de exposición y en intemperismo natural se expone a 3 años.

### **Equipos de evaluación de rendimiento de pintura**

Los equipos para evaluar corrosión se pueden encontrar en diversos tamaños, según las necesidades de producto a evaluar, existe cámaras donde se puede ingresar el tamaño de chasis de vehículo y pequeños para autopartes. Estos equipos pueden ser programados para generar diferentes tipos de ambientes en determinados tiempos, tienen la habilidad de desarrollar la mayoría de los requerimientos de los OEM, la prueba más común es la exposición a niebla salinas, exposición ambiente húmedos o condiciones cíclicas, donde cada determinado tiempo realiza un cambio a otro ambiente como humedad o secado. En la Figura 13 se muestra una imagen de una cámara de corrosión común para partes medianas o pequeñas. Cuando la parte a evaluar es superior, existen cámaras de corrosión de tamaño de una habitación o se puede pactar con cliente seccionar la pieza y evaluar una parte representativa, los cortes generados se cubren con cinta o ceras.



Figura 13 Ejemplo de equipo de prueba para corrosión acelerada.  
(Q-Lab.com 2022)

Previo a la exposición se realiza un corte con navaja a la muestra, este corte debe pasar a través del recubrimiento y fosfato, debe llegar al sustrato, los cortes son variados y dependen del requerimiento de cliente. En la siguiente Figura 14 se muestran configuraciones de cortes que se realizan a las muestras para ser expuestas.

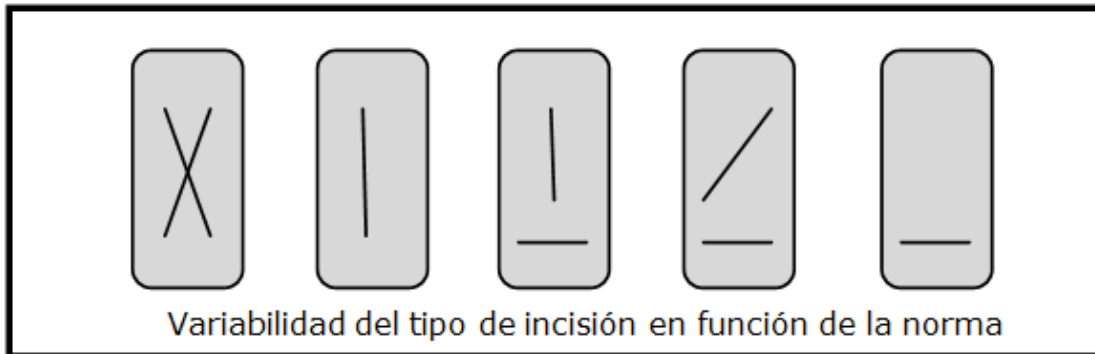


Figura 14 Tipos de rayado previo a prueba de corrosión acelerada.  
(proquimia.com/, 2022)

Después de ser expuestas se procede a la evaluación del resultado, la condición que se evalúa después de un corte es la delaminación o avance de corrosión en la zona de corte. Puede ser la medida de mayor delaminación considerando uno o ambos lados, promedio de 5 mediciones a una separación específica, o tomando en cuenta el mayor y menor delaminación. La Figura 15 muestra los pasos para evaluar la delaminación, se limpia la zona de corrosión para exponer la zona donde se desprendió la pintura, en seguida con un gauge se mide la distancia desprendida del corte y se compara con el criterio de aceptación para emitir un juicio.

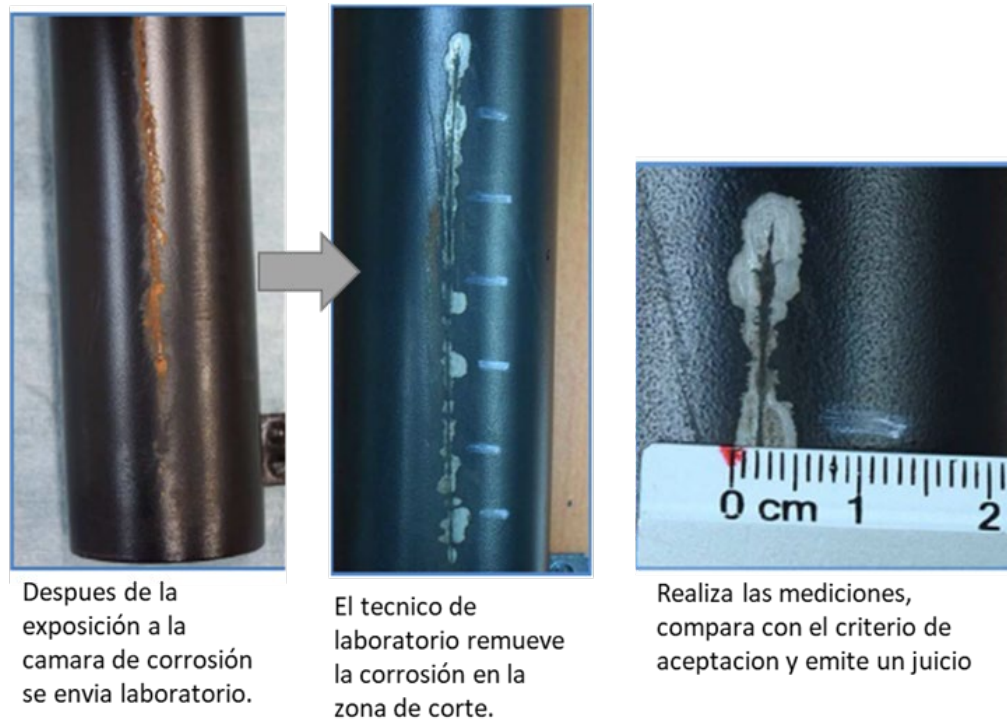


Figura 15 Evaluación de condición de rayado después de exposición a prueba de corrosión acelerada.  
Elaboración propia

Existen otras condiciones que se evalúan después de una prueba de corrosión como ampollamiento, corrosión superficial, corrosión en soldaduras, corrosión en filos y adherencia.

Las pruebas de resistencia a los químicos, puede ser por inmersión o sobreposición del químico, regularmente se utilizan paneles ya sea estándar o de sustrato, el químico a utilizar y el tiempo de exposición va de acuerdo con cada norma de cliente, se utiliza un recipiente para inmersión y se expone a la condición atmosférica durante un tiempo especificado. En la Figura 16 se muestran ejemplos de las pruebas.

### Resistencia química a ácidos

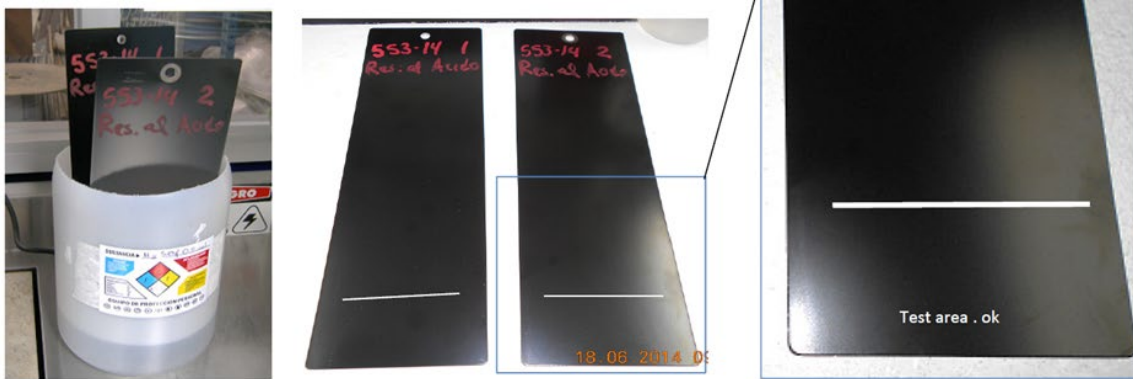


Figura 16 Exposición a solución acida.  
Elaboración propia

### Resistencia química al aceite

Se somete el panel pintado a un recipiente, el recipiente se ingresa a un horno y se eleva a temperatura superior a los 100 °C durante horas definidas por especificación. La Figura 17 muestra los paneles pintados sumergidos en aceite y después llevados a horno buscando simular la exposición en el vehículo con aceite de motor caliente, se espera que no haya desprendimiento, fisuras o pérdida de brillo al ser lavadas posterior a la prueba.

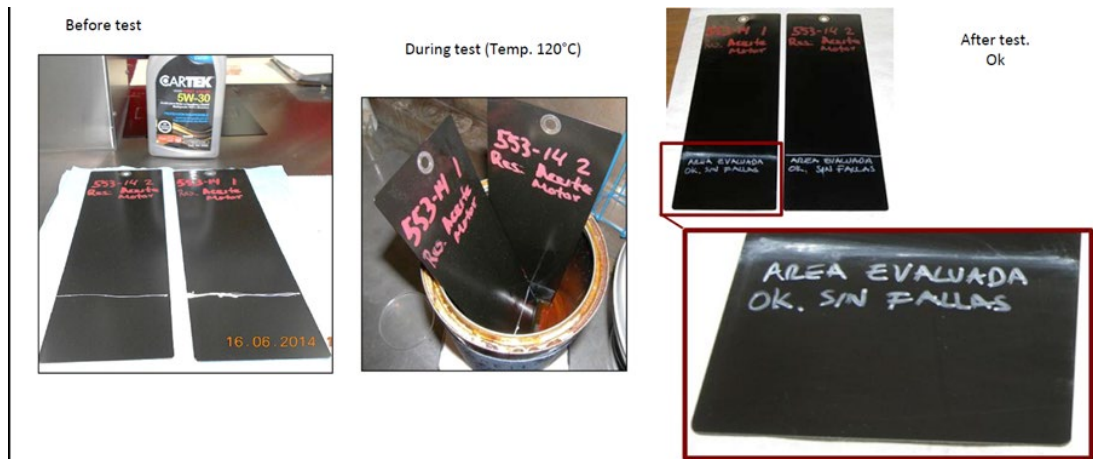


Figura 17 Exposición al aceite.  
Elaboración propia



### Resistencia química al anticongelante

A diferencia de otras pruebas, aquí solo se sobrepone una cantidad sobre el panel pintado como se muestra en la Figura 18.

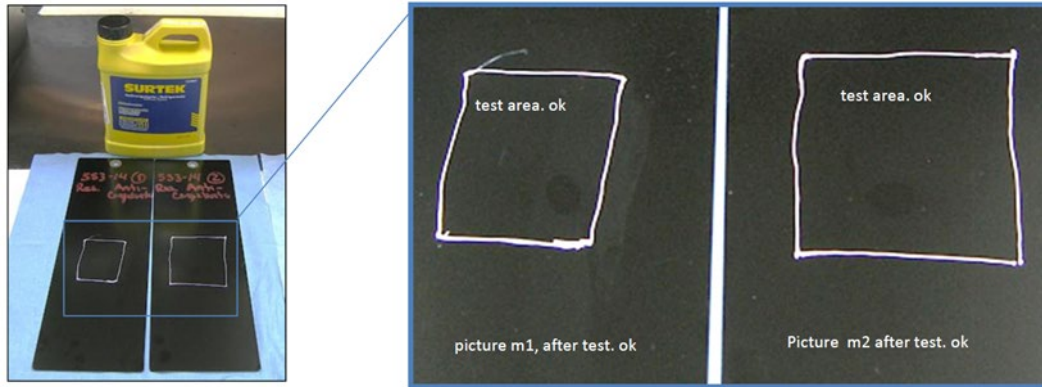


Figura 18 Exposición al anticongelante.  
(Elaboración propia).

En todos los casos, el recubrimiento no debe presentar fallas de cambio de brillo, delaminación, ampollamiento o rompimiento del recubrimiento.

Las pruebas de resistencia físicas se evalúan principalmente en panel estándar o placa de sustrato debido a que los equipos de medición están diseñados para formas geométricas específicas.

### Resistencia al impacto por grava

La prueba de resistencia al impacto por grava simula el ataque de este material en un camino impactando sobre las partes del vehículo, el recubrimiento debe tener capacidad hasta cierta medida de disminuir el daño por los impactos producidos. El equipo como se muestra en la Figura 19 consta de una tolva para alimentación de grava, un túnel donde se genera el disparo de grava, la sujeción de panel para recibir el disparo, un compresor para generar la presión de disparo y la grava que puede ser de diferente calibre.

La norma como la SAE J400 genera una ayuda visual para determinar el resultado, se considera la cantidad de golpes que atravesaron el recubrimiento y el tamaño

de éstos. Con estos datos se genera una clasificación y se compara el resultado con el requerimiento.



Figura 19 Ejemplo de equipo de resistencia a la grava.  
(made-in-china.com, 2022).

Otra prueba es la medición de la resistencia al impacto. El panel como espécimen de prueba se coloca en una base, la cual es el área donde se recibirá el impacto. El peso del objeto de impacto, la altura donde se coloca como punto inicial y el punto de impacto están especificados en la norma ISO 6272-2. El resultado es una deformación en el panel, observando así, si posterior al impacto se presenta delaminación del recubrimiento. En la Figura 20 se muestra el equipo de prueba y en la Figura 21 una imagen de un espécimen ya probado.

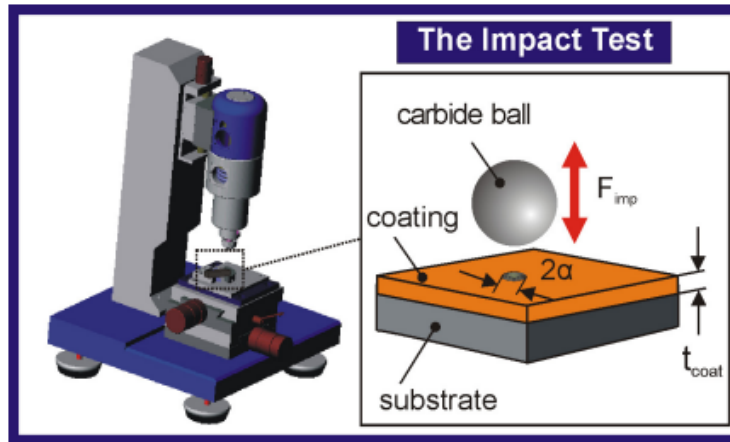


Figura 20 Equipo de prueba de impacto.  
(C. David, 2007).

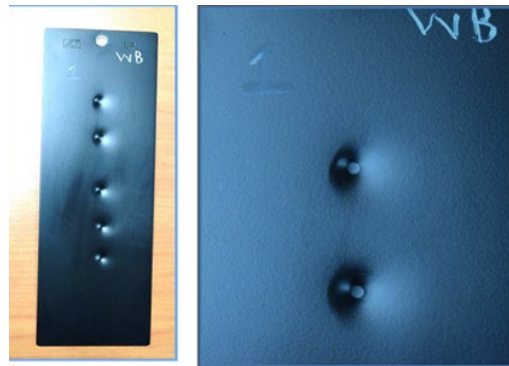


Figura 21 Vista de una muestra después de prueba de impacto.  
Elaboración propia

### Prueba de flexión

La prueba de flexión determina la elasticidad del recubrimiento, existen aparatos con base cilíndrica o base cónica donde se genera el doblar, las condiciones de prueba que se especifican en la norma son: Tipo de base de flexión, cilíndrico o cónico, diámetro de la base para flexión, ángulo de dobles, velocidad de dobles, y se evalúa si el recubrimiento se separa o deslaminar el sustrato.



Figura 22 Equipo para prueba de flexión.  
(pekachemie.com, 2022).

Las pruebas de resistencia al ambiente, se puede apreciar que algunos vehículos viejos tienen la pintura dañada, el recubrimiento transparente desprendido y el color degradado, esto se debe a la radiación solar, el calor y la humedad son condiciones que promueve la aceleración del envejecimiento.

### 3. PROCEDIMIENTO

En la Figura 23 se muestra diagrama de flujo, en forma general la secuencia de pasos que se realizó para el desarrollo del proyecto.

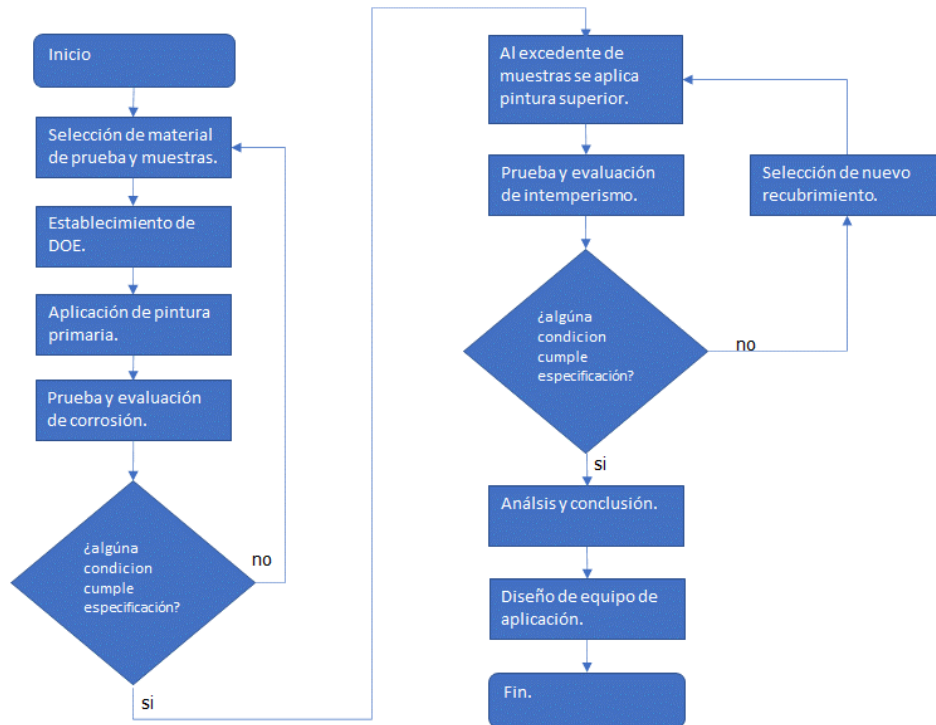


Figura 23 Diagrama de flujo, procedimiento de desarrollo de pruebas.  
Elaboración propia

Materiales: Pintura 389 epóxica base agua, Pintura 795 epóxica base agua, Pintura 480 homopolímero de diisocianato base solvente. Aditivo basado en mezclas de amidas y aminas base agua.

Equipos de prueba: Q-sun XE-2 Xenon test chamber de la marca Q-LAB para evaluaciones de exposición arco Xenón, CRH 1100-HSC QFOG corrosión test chamber de la marca Q-LAB para evaluaciones de corrosión y Novo-Gloss 60/20 Glossmeter de la marca GARDCO.

Un experimento es una prueba que se realiza bajo condiciones controladas para observar un resultado. Cuando en un conjunto de experimentos se modifican factores o condiciones con la finalidad de obtener resultados diferentes, esto ya se denomina diseño de experimentos o DOE (Design of Experiment por sus siglas en inglés). Esta metodología es normalmente utilizada en las industrias para generar mejoras en los procesos, reducción de costos y productividad con información confiable para obtener resultados que producen cambios representativos.

Con la finalidad de establecer el proceso que cubra los requerimientos de cliente se utiliza la metodología DOE donde se van a relacionar factores de proceso y los resultados se mostrarán de manera visual y gráficamente con ayuda de software como MINITAB™.

Para utilizar esta herramienta se determina el objetivo, factores que intervienen en el proceso, el método de evaluación del objetivo, así como el control de los factores.

El objetivo

El objetivo se basa en el requerimiento específico de cliente indicado en la norma STD 121-0001 con clasificación Y600-3:

- Objetivo 1. Avance de corrosión menor o igual a 10 milímetros sobre los cortes realizados en las muestras de acuerdo con norma STD 1021,2.
- Objetivo 2. Porcentaje de corrosión superficial después de prueba de cámara cíclica menor a  $R_i(0) = 0\%$  de acuerdo con norma STD 420-0002.
- Objetivo 3. Porcentaje de pérdida de color después de exposición a irradiación por lámpara de Xenón menor o igual a grado 1 (Cambio insignificante) de acuerdo con norma STD 423-0041.
- Objetivo 4. Porcentaje de pérdida de brillo después de exposición a irradiación por lámpara de Xenón menor o igual a  $83/60^\circ$  de acuerdo con norma STD 423-0023.

Los objetivos indicados son cuantitativos, es decir, los podemos medir y tienen valor mínimo requerido.

### 3.1. FACTORES

#### Factor pretratamiento

Los factores o variables que se pueden encontrar en un proceso de pretratamiento son variados, en el proceso de pretratamiento, por ejemplo, se cuenta con 11 etapas o baños, en estos baños se controla alcalinidad, pH, contenido de grasa, conductividad, acidez libre, acidez total, contenido de zinc, níquel, manganeso, puntos activos, etc. Estos factores se utilizan para realizar la preparación de pieza para recibir pintura, la finalidad de este proceso es generar un recubrimiento de conversión sobre la superficie metálica.

#### Factor pintura primaria

La capa de pintura primaria es la encargada de proporcionar resistencia a corrosión, tiene buen anclaje en el pretratamiento y la resina epóxica es la comúnmente utilizada. La pintura se presenta en la tecnología llamada "Dos componentes" base agua, se le llama así debido a que el pigmento y el catalizador va separado por eso se denomina "Dos componentes" y el diluyente es agua desionizada.

Las características del factor de pintura primaria son:

- Relación de mezcla, la relación de mezcla es un parámetro establecido por el fabricante de pintura, para una cantidad de pigmento debe hacer una específica cantidad de catalizador, si no se cuenta con la cantidad adecuada de catalizador la pintura no va a endurecer, el recubrimiento va a quedar líquido y soluble, caso contrario, si el catalizador se excede la superficie tiende a ser pegajosa por el sobrante de catalizador.
- Flujo de pintura, es uno de los determinantes de la capa de espesor de pintura resultante, el aumento o reducción de pintura no debe modificar la relación de mezcla entre el pigmento, catalizador y diluyentes.

- El espesor es resultante de flujo de pintura, cantidad de diluyente, voltaje de aplicación, una aplicación manual de pintura y el programa de aplicación, la gran cantidad de factores que pueden influir en el espesor genera una variación considerable por lo que maneja rangos amplios de aceptación, entre 20 y 60 micrómetros de capa.
- El voltaje de aplicación es importante ya que, si no se genera carga en la aplicación de pintura, el desperdicio es más de 50 %, un voltaje apropiado para generar la corriente a través de las partículas de pintura es atraído por la pieza a pintar, el aprovechamiento es mayor.
- El programa de aplicación es generado por el ingeniero de pintura, y este va relacionado con la forma y longitud de la pieza a pintar.
- Mantener la condición ambiental para aplicación de pintura es importante, por lo que, las cabinas cuentan con UMAs (Unidad Manejadora de Aire), esto permite controlar la temperatura y humedad de la cabina. Estas condiciones sirven para mantener la partícula de pintura húmeda en el transcurso de la boquilla a la pieza, recordando que la pintura esta catalizada, lo que significa que está endureciendo.
- El pre-secado de pintura es un proceso que se da por automático, es decir, esto se da con el tiempo debido al espacio que hay entre las etapas de pintura, es importante para evitar escurrimientos, si se aplica pintura fresca, sobre pintura fresca, esta tiende a generar escurridos.
- El curado de pintura sucede al hornear la pintura, en algunos casos no es necesario un horno, puede llegar a secar a temperatura ambiente, pero esto puede tomar más de una hora y resulta improductivo, en el curado o secado de pintura se genera el entrecruzamiento de las resinas de pintura.
- El tipo de pintura va relacionado con la tecnología del fabricante, anteriormente se describió sobre las diferentes bases que puede haber en la pintura automotriz, pero dentro de la misma base de pintura también hay variaciones de composición y diluyentes, regularmente su relación de mezcla también varia.



- También hay opciones de aditivos, estos aditivos se aplican en la misma pintura o en la pieza antes de pintar, la intención es pasivar el metal y fomentar la adherencia de pintura.

Los factores antes descritos son parámetros que en muchos casos son estándar debido a requerimiento de fabricantes de pintura y composición de línea de pintura, por lo que generar cambios en ellos no es posible en automático, manualmente se pueden variar, pero no es viable ya que no se puede implementar.

Se genera mediante el software Minitab™ un diseño factorial de dos factores, donde el factor "tipo de pintura" se realiza a 3 niveles y el factor "aditivo" se considera a dos niveles como se muestra en la Tabla 5. La tabla generada se muestra para realizar las pruebas en orden aleatorio para mayor confiabilidad de los resultados.

Tabla 5 Creación de diseño factorial, el factor tipo de pintura de 3 niveles y el factor aditivo de dos niveles.

↓	C1	C2	C3	C4	C5-T	C6-T
	StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Tipo de pintura	Aditivo
<b>1</b>	11	1	1	1	Tipo 389	Con
<b>2</b>	4	2	1	1	Tipo 795	Sin
<b>3</b>	10	3	1	1	Tipo 795	Sin
<b>4</b>	3	4	1	1	Tipo 795	Con
<b>5</b>	12	5	1	1	Tipo 389	Sin
<b>6</b>	8	6	1	1	Tipo 480	Sin
<b>7</b>	2	7	1	1	Tipo 480	Sin
<b>8</b>	5	8	1	1	Tipo 389	Con
<b>9</b>	7	9	1	1	Tipo 480	Con
<b>10</b>	9	10	1	1	Tipo 795	Con
<b>11</b>	6	11	1	1	Tipo 389	Sin
<b>12</b>	1	12	1	1	Tipo 480	Con

Elaboración propia

### 3.2. ELABORACIÓN DE PRUEBAS DE CORROSIÓN

Las muestras se someterán a prueba de corrosión que consiste en sometimiento a una cámara de condiciones compuestas durante 6 semanas según norma STD 423-0014, esta norma sigue rigurosos métodos de calibración y diseño de equipo para prueba, así como la preparación de esta, empezando por la preparación de la condición salina.

- a. La solución se prepara con agua destilada con una conductividad máxima de  $25 \mu\text{S}$ , se agrega sal (cloruro de sodio) con limitaciones de impurezas especificadas, la concentración de sal es de 1 %, esta sal se va a acidificar hasta llegar a un pH de  $4.2 \pm 0.2$ , se utiliza ácido sulfúrico.

A diferencia de otras normas que utilizan una concentración de 5 % de sal, no se acidifican, esta condición de acidez es la promotora de la corrosión electroquímica.

- b. Los objetos de prueba se colocarán en la cabina sobre soportes con su superficie de prueba hacia arriba. El ángulo al que se expone la superficie de los objetos de prueba en el armario es importante. En el caso de objetos de ensayo planos, el ángulo de inclinación de la superficie de ensayo será preferiblemente de  $15^\circ \pm 5^\circ$  con respecto a la vertical. En el caso de superficies irregulares, por ejemplo, componentes completos, este ángulo se mantendrá lo más cerca posible. Regularmente se busca la posición de prueba de acuerdo con la posición de montaje en el vehículo, cuando el objeto es mayor a la cabina de prueba, se puede acordar recortar las piezas.

Los soportes con los objetos de prueba se colocarán al mismo nivel en la cámara climática. Los stands serán de material inerte no metálico, como vidrio, plásticos o madera debidamente revestida. Si es necesario suspender el objeto de ensayo, el material utilizado no será en ningún caso metálico, sino de fibra sintética, hilo de algodón u otro material aislante inerte. Esto debido a puede influir a la corrosión de los objetos de prueba.

- c. Composición de los ciclos de prueba, esta norma tiene particularidades a diferencia de otras debido a que contiene subciclos, y estos son modificados dos días a la semana, los describimos a continuación de manera general.

Los subciclos duran 12 horas y hay dos diferentes subciclos.

Subciclo número 1 consta de 4 pasos.

- Paso 1. Mantener 35 °C a 95 % RH durante 4 h.
- Paso 2. Incrementa 45 °C reduce a 50 % RH durante 2 h.
- Paso 3. Mantener 45 °C a 50 % RH durante 4 h.
- Paso 4. Reducir a 35 °C incrementar a 95 % RH durante 2 h.

Subciclo número 2 consta de 5 pasos<sup>2</sup>

- Paso 1. Aspersión de solución salina durante 15 minutos.
- Paso 2. Mantener 35 °C durante 1 h 45 minutos con 95 %-99 % RH (El paso 1 y 2 del Subciclo 2 se repite dos veces más para completar las 6 horas).
- Paso 3. Secado incrementando 45 °C reduce a 50 % RH durante 2 h.
- Paso 4. Mantener 45 °C a 50 % RH durante 2 h.
- Paso 5. Reducir a 35 °C incrementar a 95 % RH durante 2 h.

La configuración de condición de la cámara de corrosión durante la semana es de la siguiente manera:

El primer periodo de 12 horas de los 7 días de la semana se llevará a cabo con el subciclo número 1, el segundo periodo de 12 horas se repetirá el subciclo número 1 solamente los días: martes, miércoles, jueves, sábado y domingo, esto significa que el segundo periodo de 12 horas del lunes y día viernes se lleva a cabo de acuerdo con subciclo número 2, se puede apreciar en la Figura 24 la formación de los ciclos.

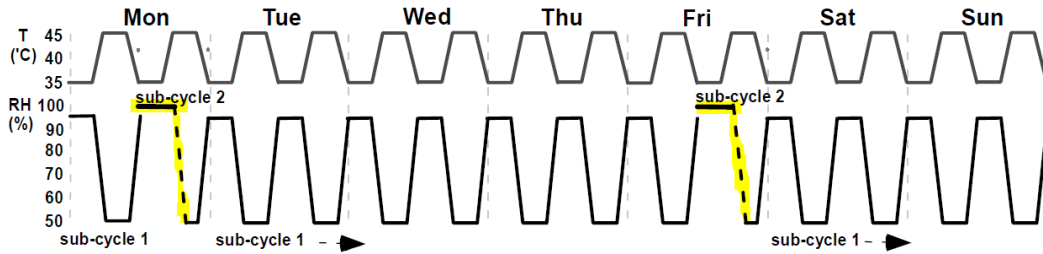


Figura 24 Comportamiento de temperatura y humedad, muestra el cambio de ciclo 1 y 2 los lunes y viernes en el segundo periodo de 12 horas del día. (Volvo STD 423-0014\_2009)

- d. El periodo de prueba es de 6 semanas bajo las condiciones descritas, esto debido a la clasificación que obtiene las piezas por dibujo.
- e. Preparación de los objetos de prueba, debido a que se va a evaluar el avance de corrosión, se requiere realizar cortes a los objetos de acuerdo con la norma STD 1021,2, la navaja y el método de corte es importante ya que de no efectuarse de manera correcta puede llegar a influir en el resultado, un corte con navaja sin filo puede llegar a dañar el recubrimiento antes de ser sometido a pruebas.

La norma pide hacer dos cortes, uno horizontal ( $0^\circ \pm 5^\circ$ ) y otro diagonal ( $30^\circ \pm 15^\circ$ ) como se muestra en la Figura 25 con una longitud entre 50 mm y 70 mm si el objeto de prueba lo permite, estos cortes deben llegar al sustrato, es decir pasar a través de recubrimiento y pretratamiento. De este modo se podrá evaluar como el recubrimiento es capaz de retener el avance de corrosión en el corte.

Una vez preparada la pieza, se ingresa a la cámara de corrosión de acuerdo con inciso b).

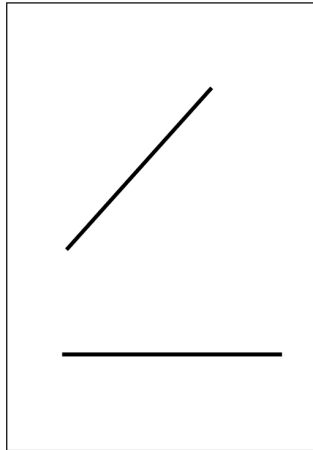


Figura 25 Forma de cortes al objeto de prueba.  
(Volvo STD 1021,2\_2002)

- f. La evaluación de los resultados se realizará conforme a requerimiento, en este caso, se requiere medir el avance de corrosión de acuerdo con la misma norma de preparación norma STD 1021,2. Se prevé avance de corrosión y se medirá de la siguiente forma.

Se descarta la distancia de 10 mm de los bordes del corte, la longitud restante se divide en 5 partes, ver Figura 26.

Se identificará la zona más lejana de ambos lados del corte y se medirá la distancia que resulte de lado a lado de corte de las 5 zonas. A cada zona se le va a descontar  $h = 0.5$  mm, ya que es el grosor de la navaja.

Se promedia las 5 longitudes medidas y el resultado se va a reportar como medición final.

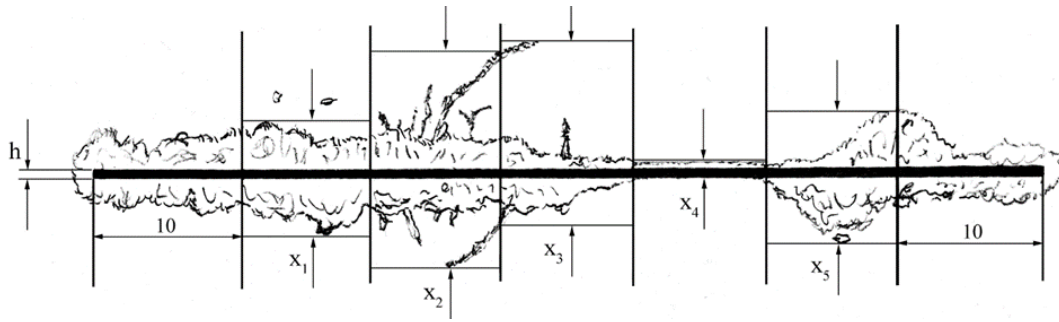


Figura 26 Método de medición de avance de corrosión.  
(Volvo STD 1021,2\_2002)

g) Otra condición que se va a evaluar es la corrosión general de acuerdo con STD 420-0002, esta norma basada en acuerdos europeos y relacionada con norma ISO se estandarizo para generar una calificación de los objetos de prueba después de haberse sometido a pruebas aceleradas de corrosión. Normas como la ISO 4628-2 cuentan con ayuda visual para sustentar un juicio de calificación. En la Tabla 6 se visualiza la escala de corrosión general para calificar los resultados de prueba, se aprecia, se realiza un comparativo de diferentes normas, americanas (ASTM) o europeas (DIN).

Tabla 6 Comparativos de criterios de evaluación entre normas europeas y normas americanas.

Escala ISO	%	Escala europea	ASTM 610
Ri 0	0.00%	Re 0	10
Ri 1	0.05%	Re 1	9
Ri 2	0.50%	Re 2	7
Ri 3	1%	Re 3	6
Ri 4	8%	Re 5	4
Ri 5	40% - 50%	Re 7	1-2

Elaboración propia

### 3.3. ELABORACIÓN DE PRUEBAS DE INTERPERISMO

En el objetivo 3 y 4 el recubrimiento que trabaja es la capa de pintura superior, estas características se evalúan después de la exposición de la luz artificial. Debido a que no es práctico esperar años para ver si un recubrimiento es capaz de soportar el intemperismo se han desarrollado diferentes pruebas que emulan y aceleran el ataque ambiental de la irradiación solar junto con condiciones de humedad hay dos tipos de luz artificial usadas, la luz ultravioleta (UV) y la luz de xenón (Xe). Cabe destacar que el periodo de prueba no tiene relación exacta con periodos reales de campo por la diversidad de usos de los vehículos, mismo efecto sucede con pruebas de corrosión.

Los equipos que simulan estas condiciones tienen una fuente de luz con intensidad regulable, estos equipos están descritos en la norma STD 1027,337 control de humedad, control de temperatura y aspersion de agua. Las características de prueba se llevan de la siguiente manera:

- a) El equipo debe contar con una lampara de arco Xenón enfriado por agua. La longitud de onda de 390 nm a 800 nm se considera 100 % de composición espectral relativa.
- b) Una de las características de estas cámaras es la aplicación de temperatura ya que esta suele degradar los polímeros.
- c) La humedad también genera alta degradación cuando se tiene la exposición de luz, los equipos deben usar agua destilada o desionizada con valores máximos de 5 mS/cm, el equipo cuenta con boquillas que generan la humectación y el sensor de humedad relativa debe estar protegido a la luz. Por tener baja conductividad de agua, no debe generar residuos en los objetos de prueba.
- d) Los sujetadores de los objetos de prueba deben ser de material inerte que no tengan algún tipo de oxidación, ya que esto puede afectar el resultado final.
- e) Las condiciones de ensayo: Irradiación continua de la fuente luminosa, con una intensidad de 0.5 W/m<sup>2</sup> a 340 nm. Esto corresponde a 550 W/m<sup>2</sup> en el

rango de frecuencia de  $290 \text{ nm} \leq \lambda \leq 800 \text{ nm}$ . La temperatura estándar de sensor de  $65 \text{ °C} \pm 3 \text{ °C}$ , la humedad relativa del  $50 \% \pm 5 \%$  y un tiempo de humectación de  $18 \text{ min} \pm 0.5 \text{ min}$ . Cada ciclo de prueba contiene humectación y un período de secado de  $102 \text{ min} \pm 0.5 \text{ min}$ .

- f) El tiempo de exposición es de 1500 h.
- g) Después de la exposición dos características deben ser evaluadas, la pérdida de brillo (STD423-0023) y la degradación de color (STD 423-0041).

El brillo es la capacidad óptica de una superficie, caracterizada por su capacidad de reflejar la luz de forma especular. La pérdida de brillo máxima aceptada es de 15 %, se debe tener una muestra patrón o retención del mismo lote con la finalidad de comparar la pieza de retención y el objeto de prueba después de la exposición.

El método geométrico para utilizar es de  $20^\circ$  y  $60^\circ$  debido al tipo de brillo de muestras inicial, el método de  $85^\circ$  se utiliza para piezas de pintura mate. El medidor de brillo consistirá en una fuente de luz y una lente que dirija un haz de luz paralelo o ligeramente convergente sobre la superficie bajo prueba y una carcasa receptora que contenga una lente, un tope de campo y una celda fotoeléctrica para recibir el cono requerido de luz reflejada. La Figura 27 muestra la forma de elaboración.

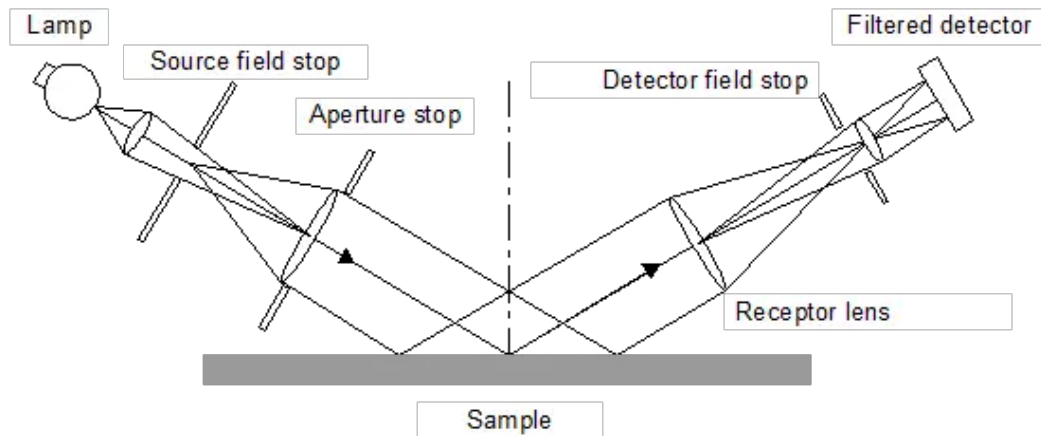


Figura 27 Medición de brillo mediante un emisor de luz y un lente detector, los grados son de acuerdo requerimiento y se generan a partir del eje vertical.  
(Volvo STD 423-023\_2008)



El valor del brillo se da por fórmula:

$$\text{Valor de brillo} = 100 * \frac{\text{Flujo luminoso reflejado por la muestra}}{\text{Flujo luminoso reflejado de patrón}}$$

Las muestras de alto brillo generan un valor mayor a 75, por lo tanto, el bajo brillo se manifiesta con valores por debajo de 75.

Para obtener la pérdida de brillo después de realizar la exposición a la luz se debe comparar entre la muestra de retención y el objeto de prueba, la diferencia deberá ser menor a 15 %, la muestra que presente menos pérdida se considera como mejor resultado.

**Color.** En los humanos, la percepción y la capacidad de distinguir diferentes colores están mediadas por una variedad de mecanismos en la retina y el cerebro (Pasmanter & Munakomi, 2019). El color como tal no existe ni se produce en ellos. Los cuerpos solo tienen unas determinadas propiedades de reflejar, transmitir o absorber los colores de la luz que reciben. La impresión del color de un cuerpo depende por lo tanto de la composición espectral de la luz con que se ilumina y de las propiedades que posea de reflejarla, transmitirla o absorberla (Jorge, 2002).

La norma STD 423-0041 es un método subjetivo para la comparación visual de colores con muestras maestras de colores. La pieza de prueba (un panel pintado) se coloca junto a una muestra maestra de color y los colores se comparan visualmente bajo fuentes de luz de diferentes longitudes de onda. La muestra maestra es una pieza pintada del mismo lote y que no fue sometida a prueba de exposición de luz arco de xenón, de este modo se establece un juicio, en la Figura 28 recorte de norma STD 223-0042, se muestra la escala que deberá ser anotada en reporte, el criterio de aceptación lo establece cada cliente. De acuerdo con la misma norma, la persona que evalúa debe ser revisada médicamente para asegurar que la persona tenga una visión cromática normal.

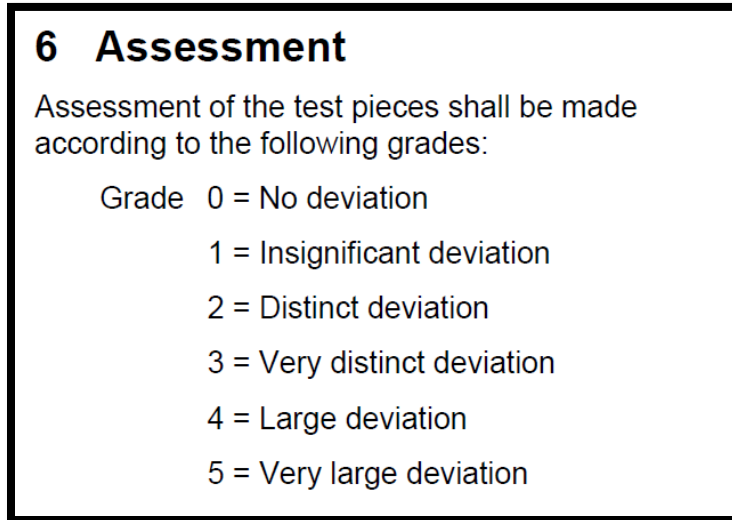


Figura 28 Escala para establecer una calificación para pérdida de color.  
(Volvo STD 423-0041\_2008)

La norma contempla diferentes tipos de luz para determinar diferencial de color: Iluminación diurna (D65).

La fuente de luz con iluminación diurna dará una distribución de potencia espectral y un nivel de cromaticidad en el sustrato de la pieza de ensayo que se corresponda estrechamente con el iluminante estándar CIE D65 y dentro del rango de 380-780 nm, tendrá una temperatura de color de 6500 K.

Luz incandescente (A)

La fuente de luz con luz incandescente deberá dar una distribución de potencia espectral y un nivel de cromaticidad en el sustrato de la pieza de ensayo que se corresponda estrechamente con el iluminante estándar CIE A y dentro del rango de 380-780 nm, deberá tener una temperatura de color de 2856 K.

Luz fluorescente (F11)

La fuente de luz con luz fluorescente proporcionará una distribución de potencia espectral y un nivel de cromaticidad en el sustrato de la pieza de ensayo que se corresponda estrechamente con el iluminante estándar CIE F11 y dentro del rango de 380-780 nm, tendrá una temperatura de color de 4000 K.

Existen equipos que tienen estas variantes de iluminación y adicionan otros tipos de iluminación, la Figura 29 muestra la forma de estos equipos, estos equipos tienen la capacidad de escoger la iluminación.

La Figura 30 representa la forma de elaboración de prueba de evaluación.



Figura 29 Equipo para comparación de color.  
(Macbeth, 2021)

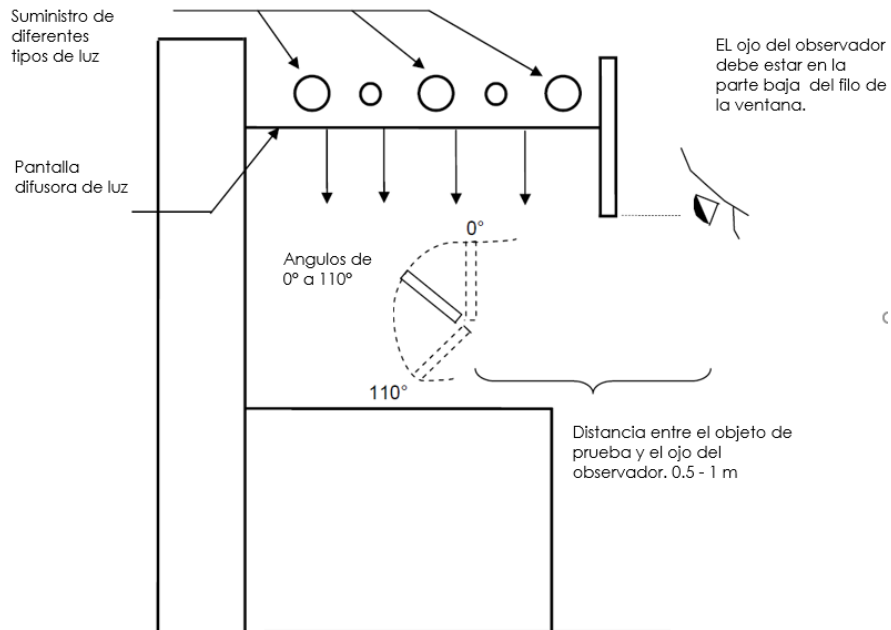


Figura 30 Forma de observación de las muestras.  
(Imagen traducida de Volvo STD 423-0041\_2008)

La evaluación de las pruebas se realizará de acuerdo con los siguientes grados en comparación con la muestra maestra.

#### Calificación

Grado 0 = sin desviación.

Grado 1 = desviación insignificante.

Grado 2 = desviación clara.

Grado 3 = desviación muy clara.

Grado 4 = gran desviación.

Grado 5 = desviación muy grande.

## 4. RESULTADOS

Previo a la solución del problema se presenta información para comprobación de las capacidades de pintura epóxica en sometimiento a irradiación solar y la pintura poliuretano en prueba de corrosión. Estas pruebas se realizaron previo a presentación de proyecto para demostrar la información teórica y las capacidades de los materiales que se tiene a la mano.

Se inicia con paneles pintados con epóxico. La prueba del concentrador de seguimiento de la luz solar (STCT) que acelera el envejecimiento bajo exposición natural se ha utilizado ampliamente para la evaluación de la resistencia a la intemperie y la vida útil de los materiales poliméricos. (Qin, 2020).

La Figura 31 muestra la degradación del recubrimiento epóxico, recubrimiento de una sola capa (primario), la pérdida gradual de brillo pasando de 24 meses, 30 meses a 36 meses. Esta prueba confirma como el recubrimiento epóxico no tiene la resistencia y no recomienda el uso en partes expuestas a exposición solar. Es necesario aplicar capa superior con características de resistencia a exposición solar, aplicar doble capa del mismo recubrimiento representa mismo resultado.

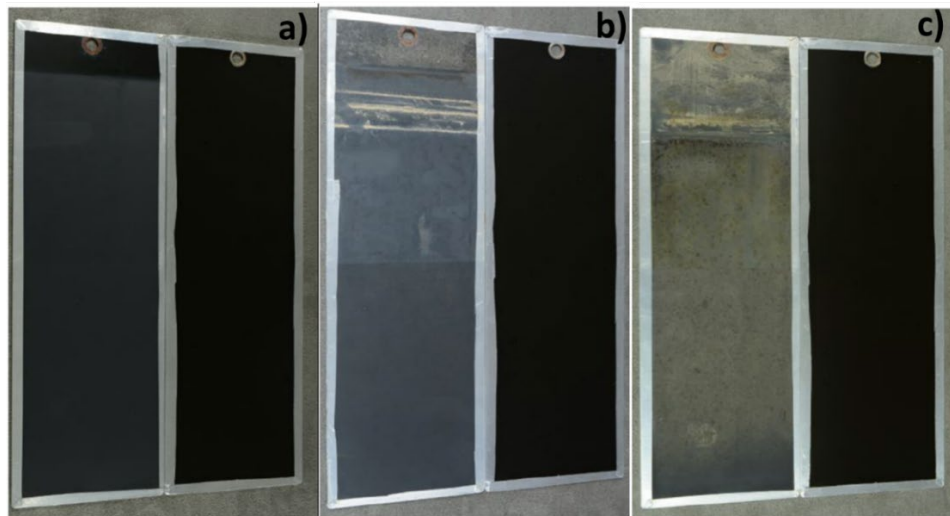


Figura 31 Exposición a prueba del concentrador de seguimiento de la luz solar STCT, a)24 meses, b)30 meses, c) 36 meses.  
Elaboración propia

Enseguida, para demostrar la capacidad de un recubrimiento poliuretano directo sobre el metal y sometido a una prueba de corrosión, los resultados se muestran en la Figura 32. Dos paneles fueron pintados, a la muestra a) se le aplicó pintura epóxica sobre el fosfato de zinc, encima del epóxico se aplicó una capa de pintura poliuretano, a la segunda muestra se le aplicó solo una capa de poliuretano. Ambas muestras se sometieron a 800 horas de corrosión de niebla salina con 5 % NaCl. La muestra a) observa buena resistencia a la corrosión, aun sin la capa poliuretano los resultados se hubiera manifestado igual. En la muestra b) se observa una pérdida de adherencia de 100 %, prácticamente la resistencia a corrosión fue generada únicamente por el fosfato de zinc.

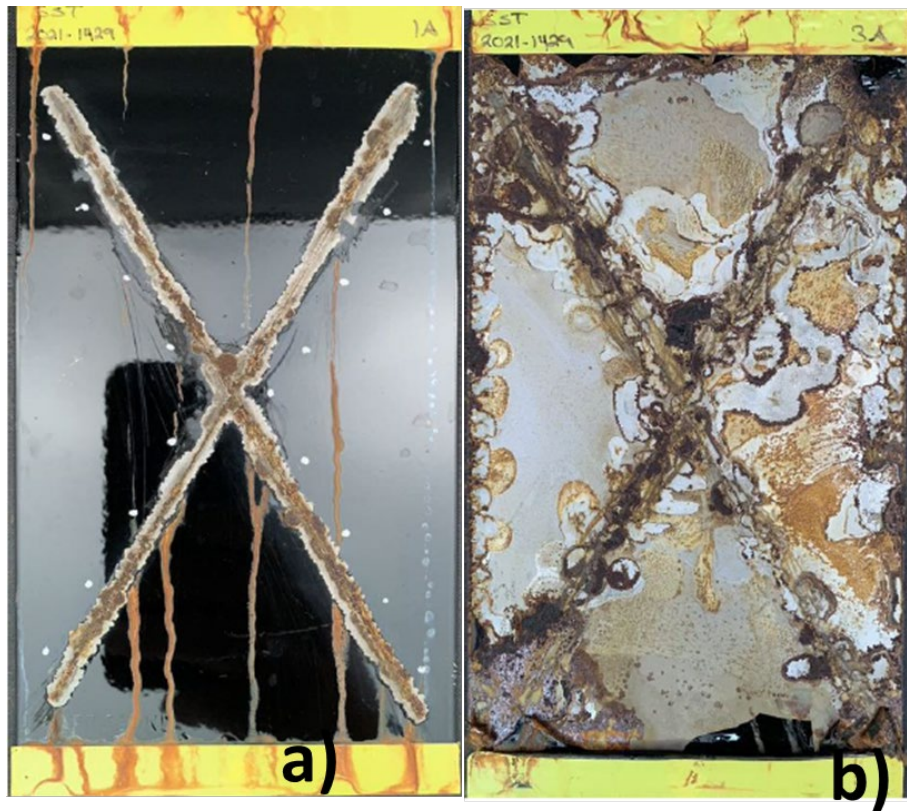


Figura 32 Pruebas iniciales sometidas a prueba de corrosión, a) Recubrimiento de dos capas epóxico como primario y poliuretano como secundario resiste la prueba, b) solo poliuretano, se aprecia el desprendimiento del recubrimiento.  
Elaboración propia

Debido a que las pinturas utilizadas corresponden a diferente tecnología, pintura primaria es base agua y pintura superior es base solvente, además de diferente proveedor, se procedió a realizar un corte seccional de la pieza a) con la finalidad de revisar la interfaz entre las pinturas. La Figura 33 muestra imágenes de la sección transversal obtenidas por microscopía óptica. Pruebas de adherencia fueron realizadas después de prueba de corrosión, observándose que no hubo desprendimiento. Se midieron los espesores de cada recubrimiento para establecimiento de rango de trabajo. El fosfato no se aprecia en esta imagen, por lo que se requiere análisis por SEM para poder detectarlo.

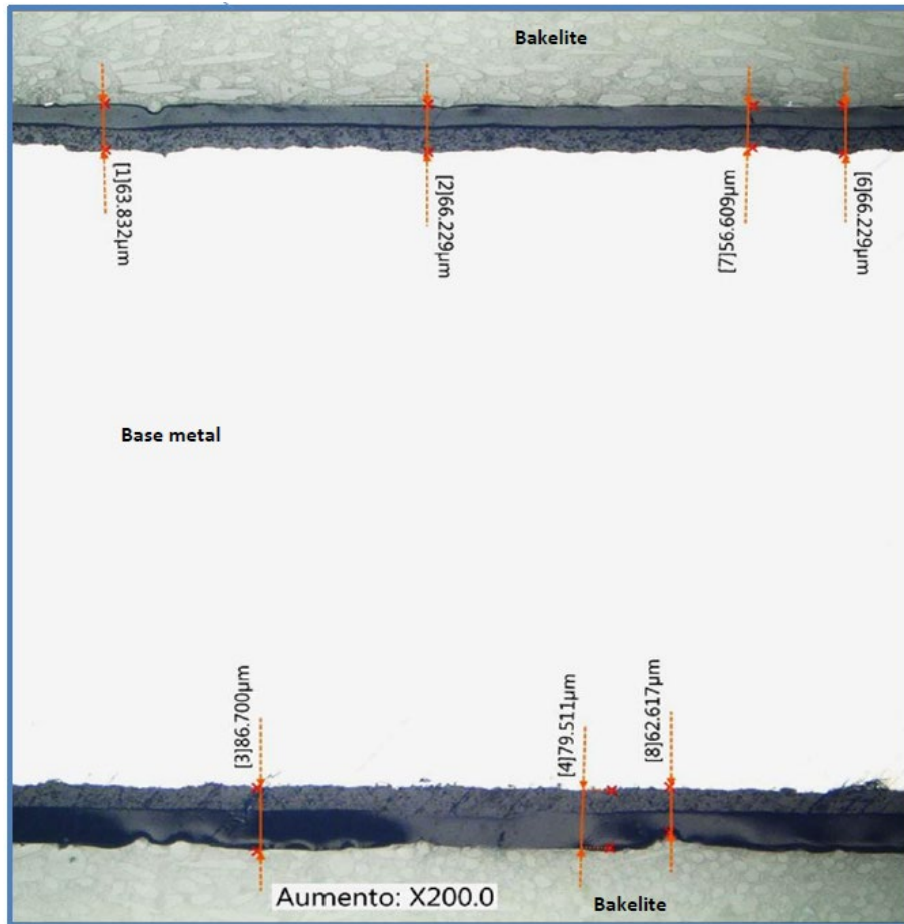


Figura 33 Corte seccional de muestra a Figura 13, para revisar la interfaz entre las capas.  
Elaboración propia

“Una película orgánica protege al sustrato metálico de la corrosión fundamentalmente por medio de dos mecanismos: Actuando como una barrera frente al medio agresivo (agua, oxígeno o iones). Constituyéndose en un reservorio de los pigmentos inhibidores de corrosión que contribuyen a retardar el ataque a la superficie metálica” (Rascio, 1989).

Las características del recubrimiento que se evalúan son:

- Color y brillo del metal como se muestra en la Figura 34. Inicialmente el material contiene contaminantes de procesos anteriores rebabas de biselado, soldaduras, aceites, grasas, polvo etc. Después del proceso el material se encuentra libre de contaminantes y un gris opaco.
- Con ayuda de un microscopio electrónico de barrido (SEM, Scanning Electron Microscope por sus siglas en inglés) se observa una estructura de cristales formados por fierro y zinc. Con este estudio podemos determinar el tamaño de cristal, la morfología y la densidad como se muestra en la Figura 35.
- Otra característica del pretratamiento es el peso de recubrimiento, la unidad de medida que se utiliza es  $\text{g/m}^2$ , para medir esta característica es necesario realizar una medición de peso inicial, se enmascarar el área que no se desea remover recubrimiento, se remueve con decapante un área determinada y finalmente se hace medición de pesaje final, se considera el diferencial para cálculo de peso de recubrimiento, Figura 36. El detalle del procedimiento de peso de recubrimiento se puede consultar en la norma ISO 3892.

El pretratamiento es parte importante en el rendimiento de la pintura, el resultado puede verse influido debido a este factor si no están las condiciones adecuadas. Este factor se considera constante siempre y cuando las características estén dentro de parámetros de proveedor. Se mantendrá densidad 100 %, Tamaño de cristal entre 3.0 y 10.0 micrómetros y peso de recubrimiento menor a  $5 \text{ g/m}^2$ .

Independientemente, de cuál pretratamiento se considera como una constante para este estudio, es importante mencionarlo para demostrar al lector con



conocimiento en procesos de pintura que esta condición fue considerada en el proyecto.



Figura 34 (Izquierda) Imagen de un tubo antes de proceso de pretratamiento, se observa brillante y residuos de proceso anteriores. (derecha) Se observa tubo sin brillo y gris opaco.  
Elaboración propia

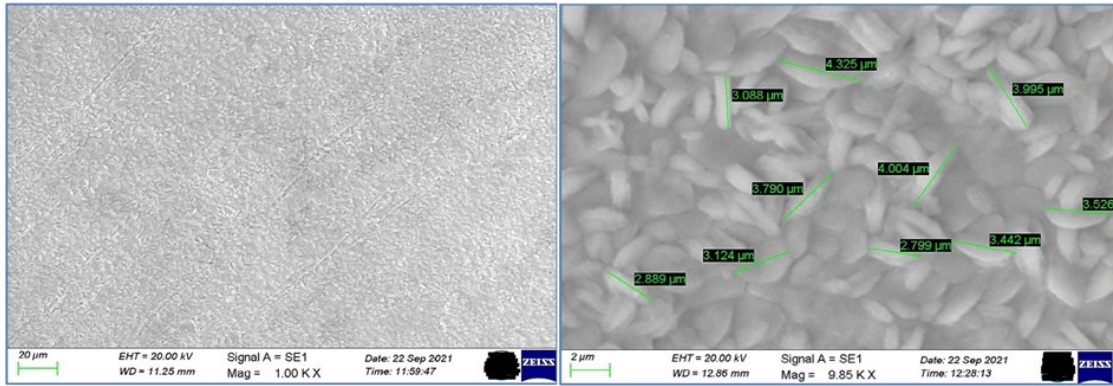


Figura 35 (Izquierda) Imagen a 1000 aumentos con SEM en esta imagen se aprecia la densidad de cristales. (Derecha) imagen a 9000 aumentos con SEM, se puede medir los tamaños de los cristales en micrómetros.

Elaboración propia

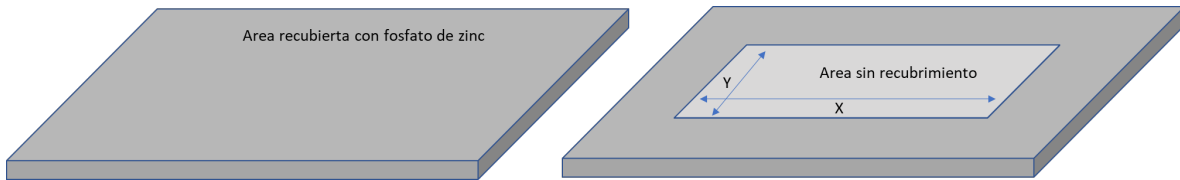


Figura 36 Imagen representativa para determinar el peso de recubrimiento, diferencial de peso antes y después de remover área determinada de fosfato de zinc.

Elaboración propia

#### 4.1. RESULTADO DE PRUEBA DE CORROSIÓN

Una vez realizada la corrida de aplicación de pintura, sometidas a las pruebas de aceleración corrosiva y evaluadas se obtiene los siguientes resultados.

De acuerdo con el método descrito de prueba corrosión cíclica Figura 37, el mismo laboratorio realiza las evaluaciones.

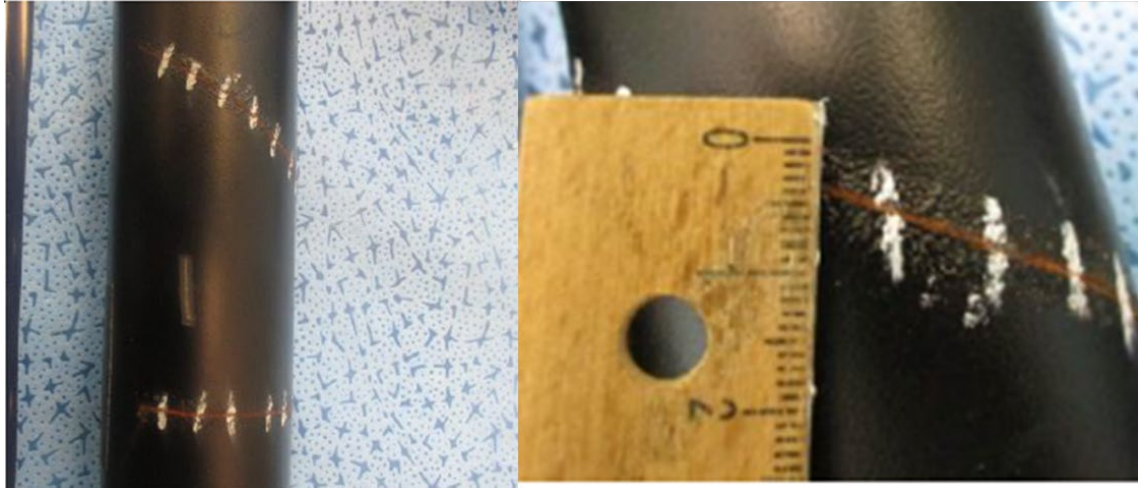


Figura 37 Imagen representativa de pieza sometida a corrosión cíclica, de lado izquierdo. De lado derecho se observa la medición del avance de corrosión.  
Elaboración propia

En la Tabla 7 se muestran los factores considerados incluyendo “tipo de pintura” analizando tres pinturas y “aditivo” mediante el uso o no de un aditivo promotor de adherencia y retardante de corrosión, los cuales son cambios intencionales realizados en el proceso en busca de obtener mejor resultado. Durante esta fase del proyecto se evaluaron dos muestras para tener resultados del avance de corrosión y de la corrosión general. De acuerdo con lo descrito en los procedimientos de prueba. El “avance de corrosión” menor se interpreta como mejor resultado, y el porcentaje de “corrosión general” donde no incluye la zona del rayado, se interpreta de igual manera, menor corrosión es mejor resultado. De manera general, entonces es posible indicar que para ambas muestras el menor “avance de corrosión” se presenta en el tipo de pintura 795 sin uso del aditivo. promotor de adherencia y retardante de corrosión. No se tiene información sobre la composición de las pinturas ni del aditivo, pero a partir de la información reportada en las hojas de seguridad MSDS (Hoja de datos de seguridad de material por sus siglas en inglés) se pueden analizar algunos efectos debidos a diferencias entre las pinturas. En la mayoría de los experimentos se observa que el uso del aditivo presenta un efecto negativo sobre el avance de la corrosión. Esto puede deberse a que este aditivo contiene una mezcla de amidas y aminas que en principio pueden entrecruzar más la resina epóxica, tal y como lo describen

Horiuchi y colaboradores (Horiuchi, Nomoto, & Nanaumi, 1995) y Kárpáti y colaboradores (Kárpáti, Ganyecz, & Nagy, 2020). Puede ocurrir que un exceso de entrecruzamiento produzca un recubrimiento más rígido que y con menor capacidad de deformarse y que por tanto pudiera causar la generación de microgrietas por donde puede ocurrir el avance de corrosión. Por otra parte, en el caso de la pintura tipo 480 fue la que presentó los resultados de mayor avance de corrosión en combinación con el aditivo. Esto se puede explicar por la naturaleza de esta pintura que está basada en un homopolímero de diisocianato. Los grupos diisocianato pueden reaccionar con las amidas y aminas para formar poliureas, tal y como se describe en los trabajos de (Rakshit, Joshi, Jain, & Shailesh, 2016) y en la revisión de Santana (Santana, Cardoso, Triboni, & Politi, 2021), que pueden presentar una menor resistencia mecánica en comparación al polímero reticulado con el que fue diseñada la pintura y causar puntos de falla por donde ocurra el ataque salino y por tanto formación de corrosión. Con respecto a las diferencias observadas entre las pinturas tipo 795 y tipo 389 los mejores resultados de avance de corrosión se obtuvieron con la 795. De acuerdo con la información de sus MSDS, la pintura 795 tiene un menor contenido de sólidos (795 – 58% de sólidos; 389 – 60.4%) y mayor contenido de disolventes orgánicos (795 – 8.5%; 389 – 6.3%). Es posible que el menor porcentaje de sólidos y mayor contenido de solventes orgánicos permitan generar un recubrimiento más homogéneo que mejore la resistencia al avance de corrosión. Otra diferencia que se pudo observar de la información a la que se tuvo acceso es que la pintura tipo 795 presenta una pequeña cantidad de otro tipo de compuesto epóxico que pudiera modificar la estructura de la red polimérica formada, y cambiando las propiedades del recubrimiento (Ou, Wang, & Lu, 2021) y (Mohan, 2013).

Tabla 7 Resultados de pruebas de acuerdo con DOE propuesto

<b>Factores</b>		<b>Avance de corrosión</b>		<b>Corrosión general</b>	
Tipo Pintura	Aditivo	Muestra 1, [mm]	Muestra 2, [mm]	Muestra 1, [%]	Muestra 2, [%]
Tipo 480	Con	14.9	16.0	0.0	0.0

Tipo 480	Sin	9.1	12.2	0.0	0.0
Tipo 795	Con	8.9	9.5	0.0	0.0
Tipo 795	Sin	6.8	6.3	0.0	0.0
Tipo 389	Con	13.3	11.1	0.0	0.0
Tipo 389	Sin	10.2	12.3	0.0	0.0

Elaboración propia

Debido a que las pruebas están limitadas por la capacidad de cámara de corrosión, la duración de prueba, así como el costo de estas, solo se consideró dos muestras por cada factor y nivel del estudio.

En el diseño de experimentos se cuenta con herramientas como un sistema de control de procesos SPC (Statistical process control por sus siglas en ingles). Esta herramienta ayuda para mantener un proceso controlado eliminando causas especiales por variabilidad y herramientas como DOE, Diseño de experimentos (Design of experiment por sus siglas en ingles). Esta herramienta es mas usada en diseño de productos y procesos, es por eso que se decide utilizarla para determinar estadísticamente la selección de materiales para el proceso y con esto, establecer el proceso.

Los factores determinados como cualitativos, debido a que no contiene niveles entre ellos son "Tipo de pintura" y el uso de un "aditivo" promotor de adherencia y retardante de corrosión.

Primeramente, se determina que la variable de respuesta es continua en función de las variables predictoras, es decir, si la variable dependiente tiene relación con las variables independientes, para esto se realiza el estudio de los residuos para determinar si se están cumpliendo las premisas de linealidad y normalidad. En la Figura 38 se muestra como los residuos del DOE tienen una regresión lineal.

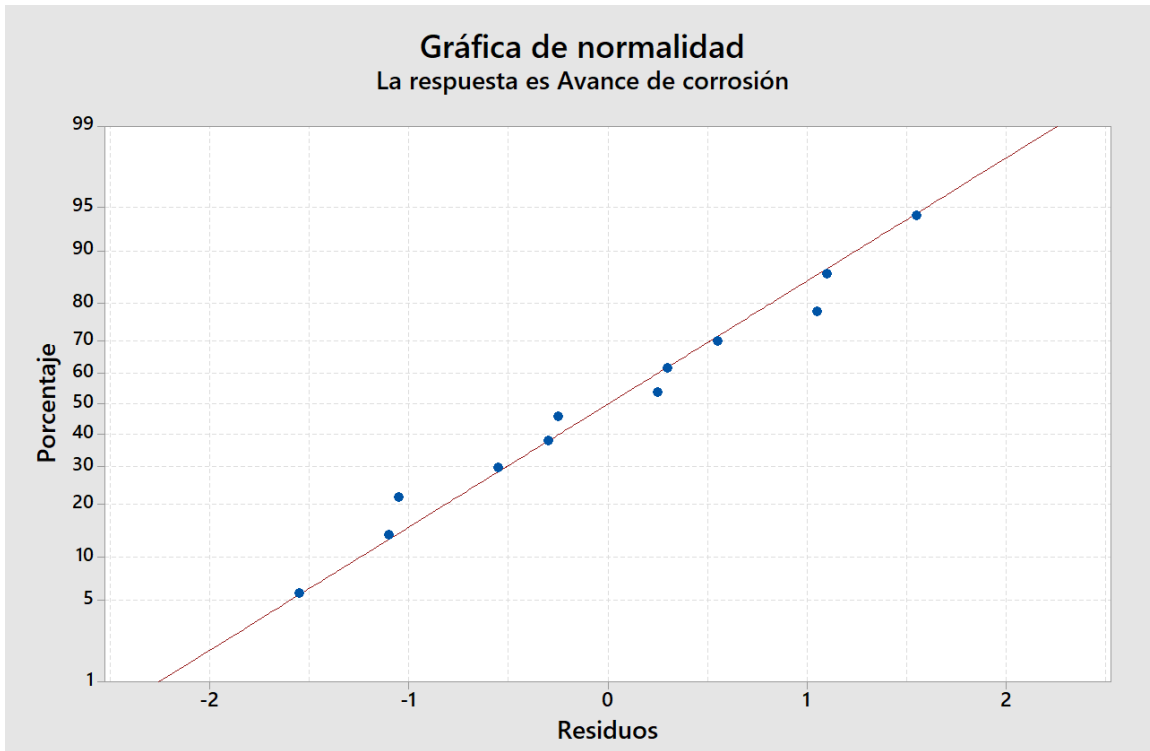


Figura 38 Gráfica de normalidad de residuos.  
Elaboración propia

Se utiliza la gráfica de residuos contra ajuste para comprobar el supuesto de que los residuos están distribuidos en aleatoriedad, y, por lo tanto, se cuenta con una varianza constante. Se observa en la Figura 39 que los residuales se encuentran en ambos lados de la línea 0 (cero) lo cual es ideal.

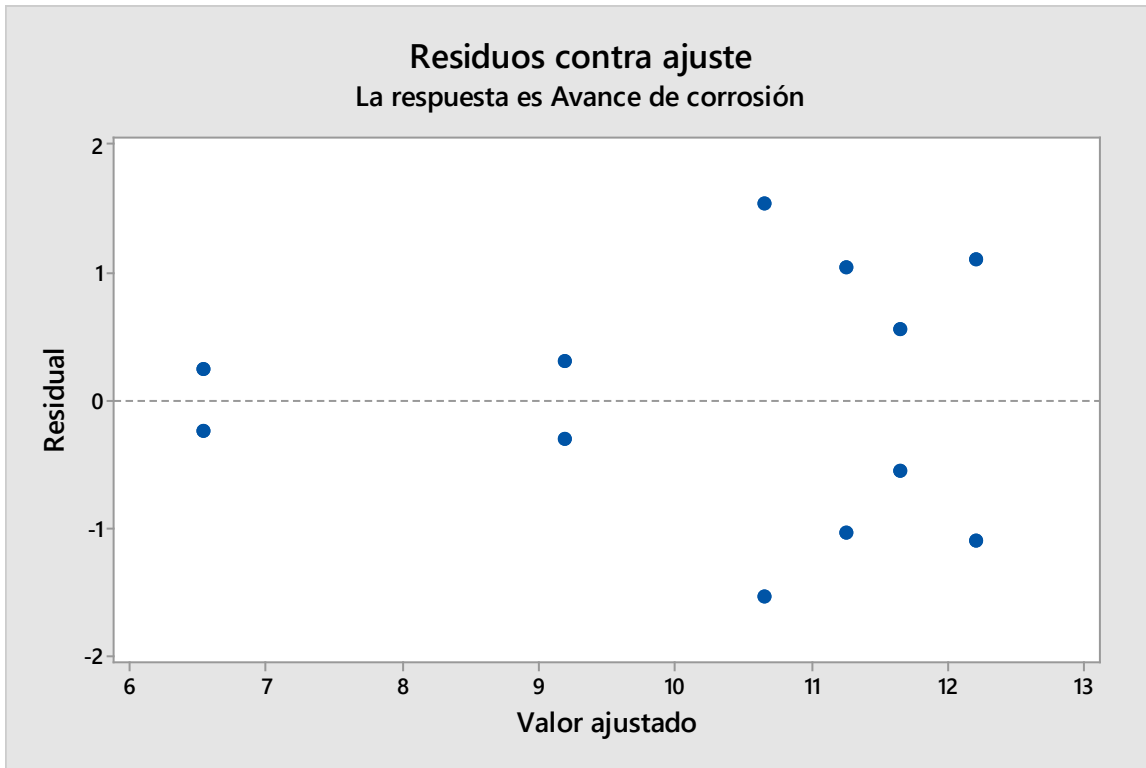


Figura 39 Residuos contra ajuste.  
Elaboración propia

Igualmente, se verifica los residuos contra orden donde la gráfica muestre los residuos en el orden en el que se recopilaron. Para este estudio se presenta la Figura 40 demostrando que el comportamiento es aleatorio sin observar un comportamiento descendente, ascendente o patrones de comportamiento que indiquen que los resultados están correlacionados y, por lo tanto, que los residuales no sean independientes.

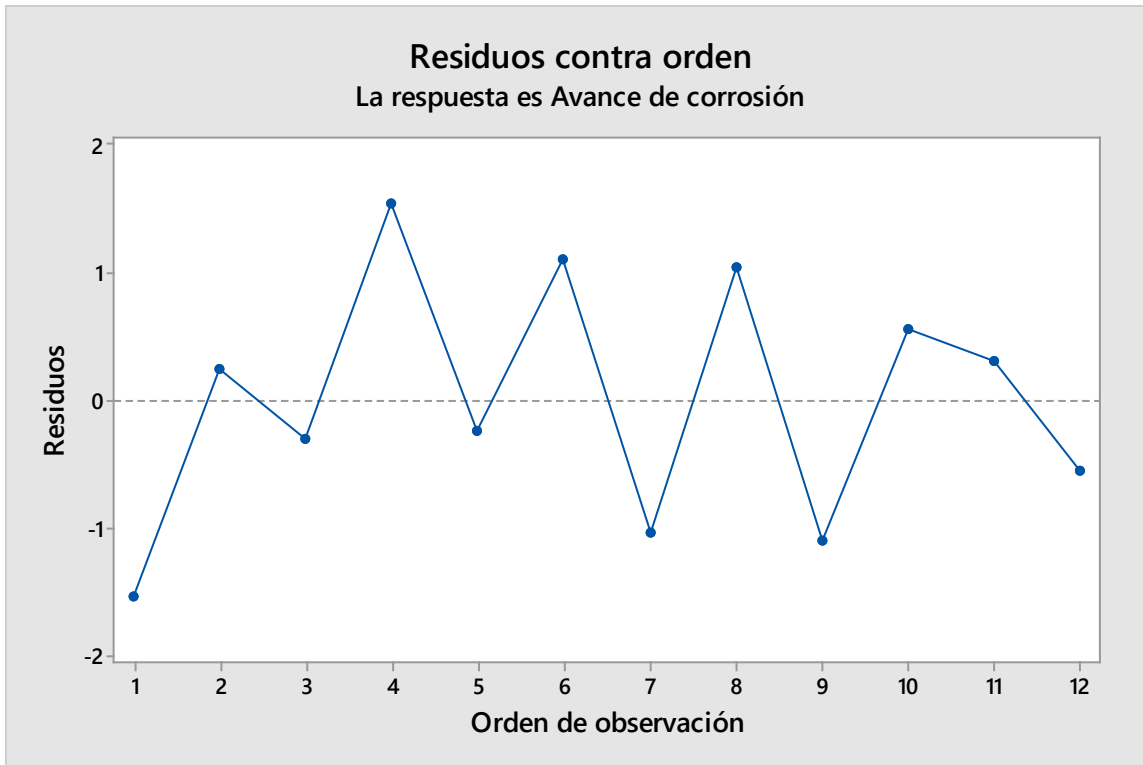


Figura 40 Residuos contra orden.  
Elaboración propia

El histograma de datos se omite en este estudio debido a que resulta más efectivo cuando se cuenta con aproximadamente más de 20 datos. En este estudio la muestra de datos es pequeña, por lo que cada barra en el histograma no contiene suficientes puntos para mostrar asimetría o valores atípicos.

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para el estudio de la variable de respuesta "Avance de corrosión" con los factores "tipo de pintura" y "aditivo" mediante la herramienta Minitab™. Se obtuvo un valor p-valor de 0.037 (3.7 %), donde el factor "tipo de pintura" muestra un valor de riesgo de 0.012 (1.2 %) y el factor "aditivo" de 0.09 (9 %). Los valores mostrados en la Figura 41.

Para determinar estadísticamente la influencia de los factores en el resultado comparamos contra un  $\alpha = 0.05$  (5 %). Se analiza los factores por separado debido a que el proceso podría prescindir de uno de los factores.



Recordando que H0 (hipótesis nula) se refiere a la igualdad. Y la hipótesis alternativa denota una diferencia de la afirmación. Los representamos de la siguiente forma.

“Tipo de pintura”

H1: El tipo de pintura genera diferencia en avance de corrosión.

H0: El tipo de pintura no genera diferencia en avance de corrosión.

p-valor <  $\alpha$  → 0.012 < 0.05, entonces acepta H1.

“Aditivo” Con/Sin”

H1: El aditivo genera diferencia en avance de corrosión.

H0: El aditivo no genera diferencia en avance de corrosión.

p-valor >  $\alpha$  → 0.09 > 0.05, entonces acepta H0.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	43,430	8,6860	5,04	0,037
Linear	3	41,558	13,8528	8,04	0,016
Tipo de pintura	2	34,505	17,2525	10,01	0,012
Aditivo	1	7,053	7,0533	4,09	0,090
2-Way Interactions	2	1,872	0,9358	0,54	0,607
Tipo de pintura*Aditivo	2	1,872	0,9358	0,54	0,607
Error	6	10,340	1,7233		
Total	11	53,770			

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,31276	80,77%	64,74%	23,08%

Figura 41 Análisis de varianza de acuerdo con resultados de corrosión.  
Elaboración propia

Asimismo, se muestra la gráfica de efectos principales de acuerdo con variables separadas en la Figura 42 solo para la variable de respuesta “Avance de corrosión”. La línea roja es el requerimiento máximo de aceptación localizada del “Avance de

corrosión" localizada a 10 mm. Así, un valor por debajo de ese límite es un valor más deseado para el ajuste y mejora del proceso de pintado.

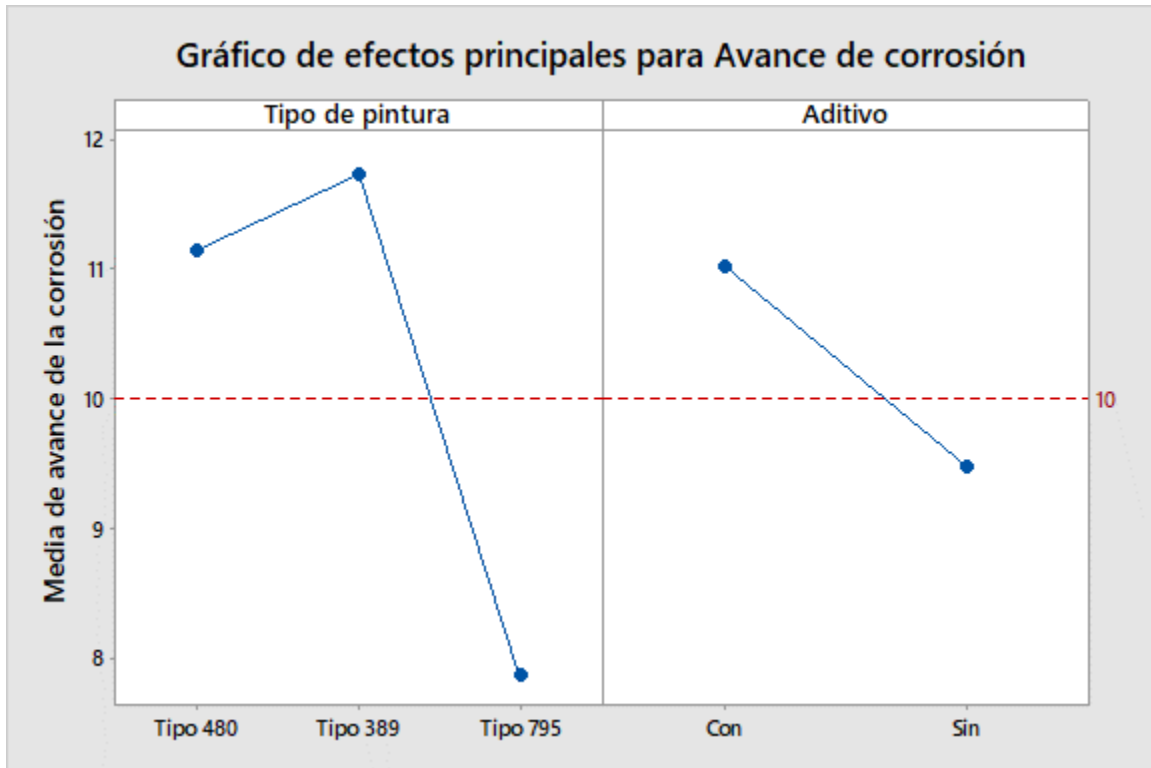


Figura 42 Gráfica de efectos principales para avance de corrosión individual. Elaboración propia

En la Figura 42 se compara contra la media del avance de la corrosión, mientras que en la Figura 43 se realiza contra un resultado mostrando la interacción de los dos factores analizados para la variable de respuesta "avance de corrosión" indicando que la mejor pintura para este estudio es el tipo 795 sin aditivo. Como se comentó previamente, el aditivo contiene grupos amida y amina que pueden causar un aumento en el nivel de reticulación del recubrimiento epóxico que lo pueden volver más rígido y por tanto con menor capacidad de deformarse, lo que hace factible que ocurra formación de microgrietas por donde avance la corrosión. Es probable que la pintura tipo 795 presente los mejores resultados por contener otro tipo de compuesto epóxico que modificaría la estructura de la red polimérica y a que forme un recubrimiento más homogéneo por el menor

porcentaje de sólidos y mayor contenido de solvente orgánico (Mohan, 2013) y (Ou, Wang, & Lu, 2021).

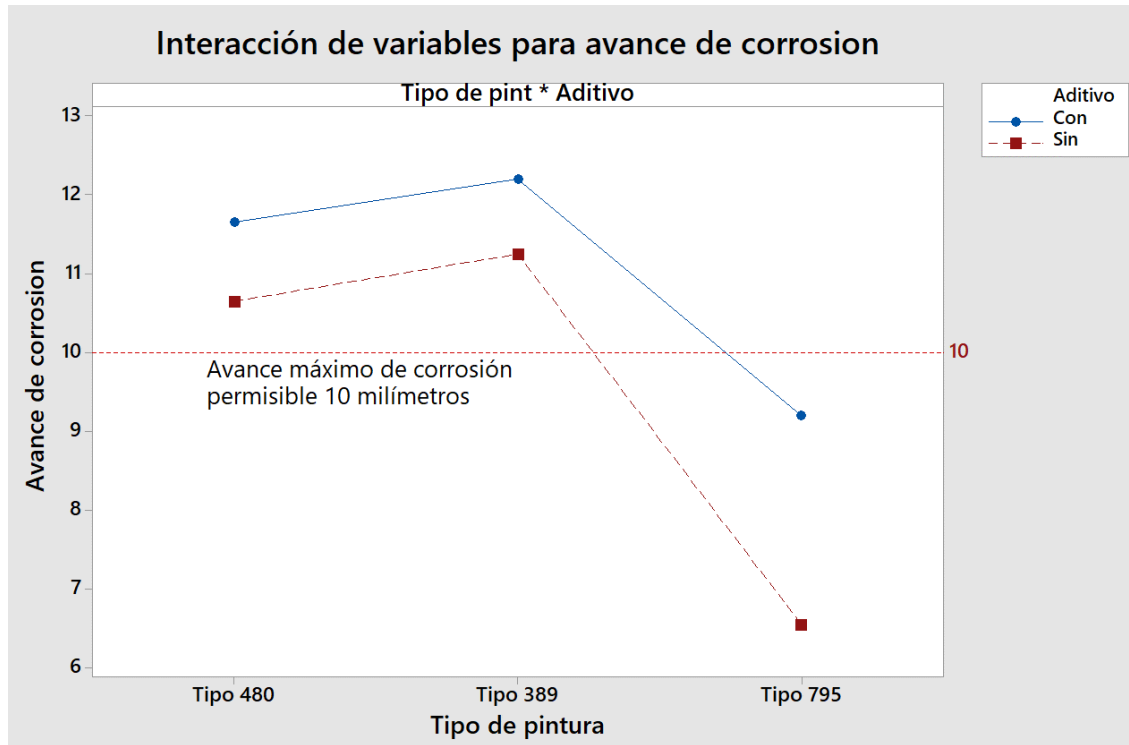


Figura 43 Gráfico de interacción de efecto con interacción de variables para avance de corrosión, mostrando límite de aceptación máximo.  
Elaboración propia

Basado en los resultados, para la aplicación de pintura primaria se recomienda el uso de pintura tipo 795, sin uso de aditivo, ya que el aditivo en todos los casos su influencia fue negativa a los resultados como se muestra en la gráfica anterior de línea azul. Será la pintura 795 la que se deberá utilizar como pintura primaria, ya que agregar las pinturas que no tuvieron resultados aceptables representa un gasto innecesario para el estudio, la aplicación de pintura superior sobre la pintura no representa una mejora en resistencia corrosiva.

#### 4.2. RESULTADO DE PRUEBA DE INTEMPERISMO

En la Tabla 8 se presentan los datos de brillo y color en tres partes. La primera parte presenta los resultados para las muestras retenidas utilizadas para contar con los

datos iniciales previo a la prueba del presente estudio. Esta información se utiliza para evaluar los cambios obtenidos en las piezas después de haber sido sometidas a pruebas. En la segunda parte de la tabla se muestran los datos medidos después de la exposición a irradiación por arco Xenón de 1500 h de acuerdo con la norma STD 1027,337. En la tercera parte, se presenta la diferencia entre la condición original y la condición después de prueba.

Tabla 8 Resultados para objetivo 3 y 4 utilizando dos diferentes componentes de pintura superior

<b>Muestras retenidas</b>					
Capas de pintura		Brillo 423-0023		Color 423-0041	
Primaria	Superior	20 °, [%]	60 °, [%]	0 °	110 °
Tipo 795	Ax01	83.2	89.5	Muestra Maestra	
Tipo 795	AN01	81.6	89.8	Muestra Maestra	
<b>1500 h de exposición</b>					
Capas de pintura		Brillo 423-0023		Color 423-0041	
Primaria	Superior	20 °, [%]	60 °, [%]	0 °	110 °
Tipo 795	Ax01	81.6	90.0	1, Insignificante diferencia	
Tipo 795	AN01	80.6	89.3	1, Insignificante diferencia	
<b>Diferencial entre muestras retenidas y muestras expuestas (Brillo. Aceptable 15%<sup>máx</sup>). Criterio de color Aceptable ≤ 1.</b>					
Capas de pintura		Brillo 423-0023		Color 423-0041	
Primaria	Superior	20 °, [%]	60 °, [%]	0 °	110 °
Tipo 795	Ax01	1.9	0.6	1, Insignificante diferencia	
Tipo 795	AN01	1.2	0.6	1, Insignificante diferencia	

Elaboración propia

De acuerdo con los resultados de la tabla se aprecia que ambas pinturas superiores cumplen con la característica de retención de color y mantienen comportamiento similar en la pérdida de brillo, valores que están bastante aceptables.

### 4.3. FACTIBILIDAD TÉCNICA

Como se mencionó anteriormente, las propiedades de las pinturas son diferentes de acuerdo con la zona del vehículo donde va a aplicar, las carrocerías, por ser zona de vista y estar expuesto a la intemperie y a fuertes ambientes corrosivos, requieren de un proceso más complejo. Evidentemente, tal multitud de requisitos no puede satisfacerse con una sola película de revestimiento, lo que da como resultado una estructura multicapa de revestimientos para automóviles, cada uno de los cuales es responsable de cumplir los diversos requisitos (Zhenhai, Gerald, & Yi, 2015). Entonces, para la industria automotriz y de vehículos pesados, existe una composición de recubrimientos tal y como se muestra en la Figura 44. Este tipo de recubrimiento común, aunque puede haber variación de acuerdo con tecnología de fabricantes, es usado en la carrocería del vehículo.

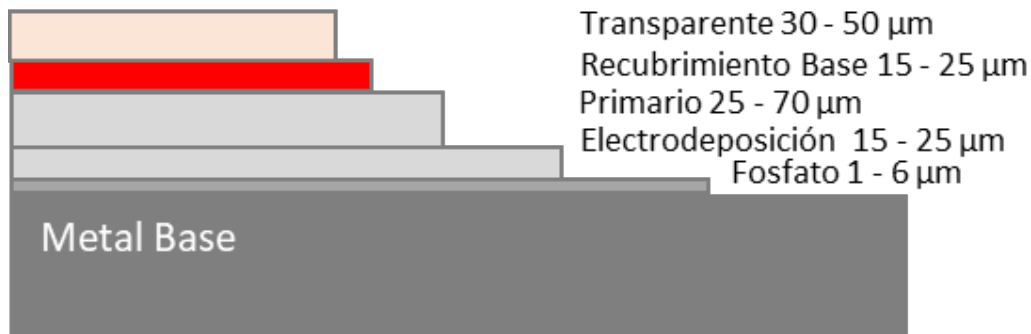


Figura 44 Recubrimiento estándar de carrocería de un vehículo.  
 Elaboración propia

Un proceso de recubrimiento completo dependiendo del diseño, puede contener hasta 25 etapas de proceso. En la Figura 45 se muestra en términos generales un proceso estándar omitiendo enjuagues, enfriado y zonas de pre secado.

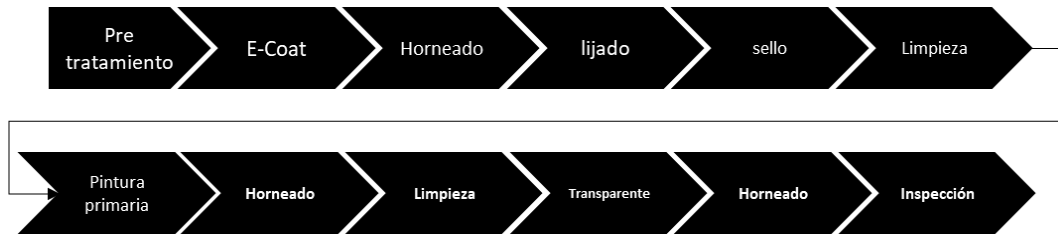


Figura 45 Proceso estándar para pintura de carrocería.  
Elaboración propia

Para mayor flexibilidad y bajo costos, los OEM se enfocan en el diseño y ensamble de los vehículos. De este modo, la manufactura de las partes y logística de miles de componentes recae en los proveedores y se enfoca mayormente en partes modulares y pocos procesos que intervengan una vez ensamblado el vehículo.

Hay un requerimiento que cae en un punto medio entre carrocería y chasis, este viene siendo el chasis de un vehículo pesado, ya que este tiene más exposición que un chasis de vehículo de pasajeros, debido a que los componentes se reciben solo con protección a la corrosión, el cliente tiene que aplicar recubrimiento con protección al intemperismo sobre los componentes recibidos.

Este proyecto está basado en una solicitud de cliente en el cual pretende eliminar el proceso de aplicación de pintura para intemperismo en sus instalaciones y los proveedores deben absorber el requerimiento final de sus productos modificando sus procesos. En la Figura 46 se muestra cómo se distribuyen los procesos entre cliente/proveedor en relación con el recubrimiento de los productos, el proveedor fabrica la pieza y aplica el recubrimiento primario. Este recubrimiento es epóxico base agua aplicado por proceso de atomización de pintura con ayuda de carga eléctrica, una vez aplicado el recubrimiento primario, los productos reciben un ensamble final y se envía a cliente, el cliente ensambla los productos recibidos por sus proveedores, realiza una preparación, aplicación y horneado de la pintura, en seguida realiza un ensamble final de partes que no desea ser pintadas.

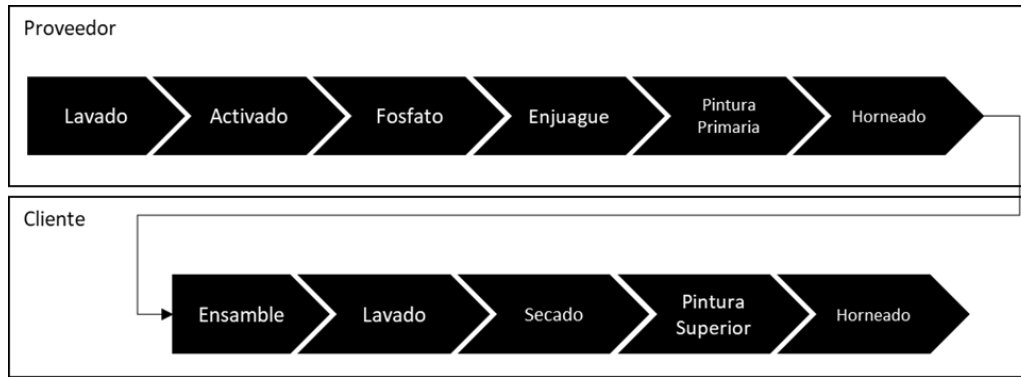


Figura 46 Proceso actual de pintura con interacción cliente /proveedor.  
Elaboración propia

En el resultado de análisis de proveedor se evidencia los beneficios que surgen al eliminar procesos de aplicación de recubrimiento de sus instalaciones. Para lograr eso, los proveedores tienen que recotizar los productos y demostrar que cumplen con los requerimientos de calidad. En la Figura 47 se muestra cómo se puede absorber los procesos de cliente y la simplificación de los procesos de cliente.

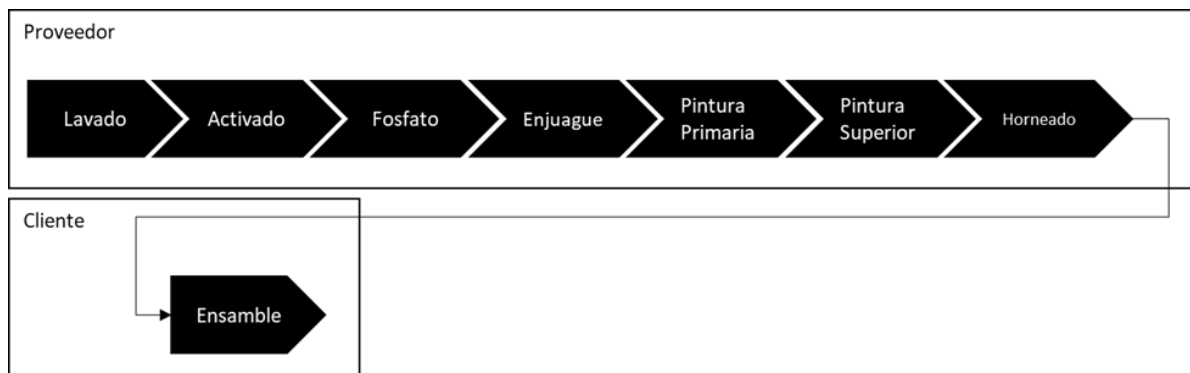


Figura 47 Proceso de pintura optimizado.  
Elaboración propia

El proveedor que absorbe la aplicación de pintura superior debe hacer su estudio de factibilidad.

- a) ¿Que debe implementar en la línea?
- b) ¿Qué materiales de recubrimiento debe utilizar?
- c) ¿Qué requerimientos de calidad debe cumplir?
- d) ¿Como se va a evaluar?



### Proceso de recubrimiento actual y propuesta de modificación

El proceso actual de pintura es un proceso estándar con pretratamiento, aplicación y horneado de pintura trasladado por transportador continuo tipo cadena aérea que pasa a través de todos los pasos, puede llegar a omitir alguno dependiendo de la variante del diseño del producto. A continuación, se muestra un diagrama de flujo general en la Figura 48.

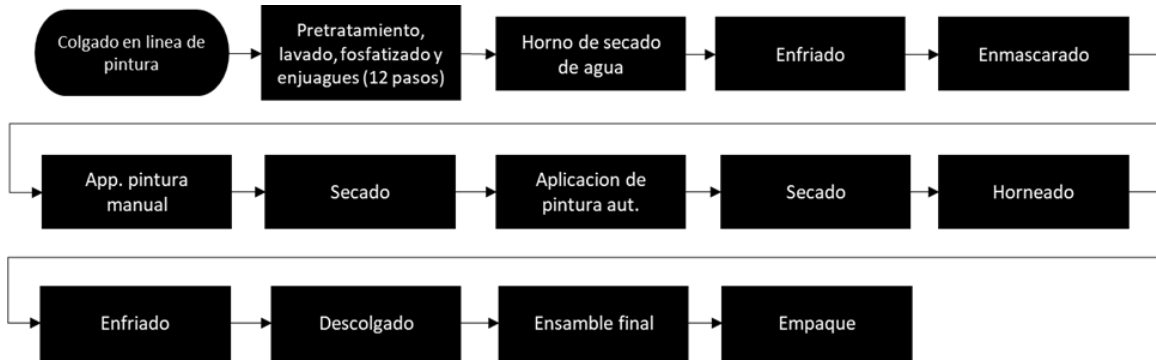


Figura 48 Proceso de pintura de una sola capa, usual en partes de chasis.  
Elaboración propia

Para hacer viable el proyecto de proveedor, se requiere realizar aplicación de pintura conocida como "wet to wet", es decir, se aplica pintura fresca sobre pintura fresca, de este modo se evita implementación de horno adicional al que se utiliza en proceso actual, o tendría que realizar un doble proceso, dos vueltas al mismo proceso utilizando pintura diferente. Ambas opciones que no incluyen el proceso "wet to wet" son inviables por espacio, inversión y logística.

La propuesta de implementación es en una sola dirección y se plantea el flujo de línea agregando 4 pasos al proceso, aplicación de pintura manual 2, secado y aplicación de pintura automática 2 y secado como se muestra en la Figura 49.

Si bien, el proceso de secado no es más que un tiempo de evaporación de agua a condiciones controladas previo a otro proceso, es importante debido a que requiere espacio y contribuye a la apariencia del recubrimiento.

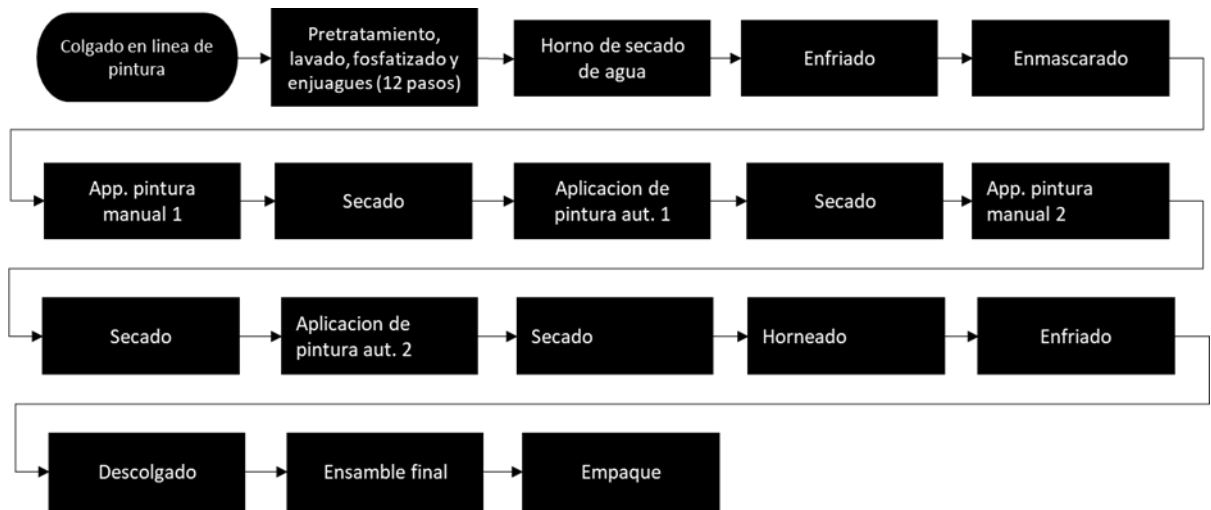


Figura 49 Proceso de pintura propuesto para aplicación de dos capas.  
Elaboración propia

Cómo se mostró anteriormente, los resultados a evaluar para validar el proceso están basados en la norma STD 121-0001:

- Avance de corrosión en milímetros sobre el rayado después de prueba de cámara cíclica de acuerdo con norma STD 1021,2.
- Porcentaje de corrosión superficial después de prueba de cámara cíclica de acuerdo con norma STD 420-0002.
- Porcentaje de pérdida de color después de exposición a irradiación por lámpara de Xenón de acuerdo con norma STD 423-0041.
- Porcentaje de pérdida de brillo después de exposición a irradiación por lámpara de Xenón de acuerdo con norma STD 423-0023.

Los resultados que se presentaron del diseño experimental mostraron que la aplicación de dos recubrimientos, uno de pintura epóxica y otro de pintura poliuretano, permiten obtener la resistencia a la corrosión y al intemperismo por envejecimiento por exposición a irradiación de lámpara Xenón que se requiere. Esto sustenta la factibilidad técnica de la propuesta y justifica el cambio de proceso que se plantea en la figura previa.

En la Figura 50 se muestra como sería la configuración dentro de Lay Out de planta, se cuenta con una línea de pintura diseñada para 4 cadenas transportadoras aéreas, pero solo 3 cadenas fueron instaladas dejando espacio para una cuarta cadena en caso de necesitar incrementar la capacidad, La cuarta cadena se puede instalar espejo frente al equipo identificado como 1. Se presenta una lista para explicar la imagen:

- En líneas verdes la línea que actualmente está instalada sobre un área de 2137 m<sup>2</sup>.
- La zona azul marcada, es espacio disponible para una cuarta cadena.
- El diseño convencional marca que se instale espejo frente al equipo identificado 1.
- La cadena es un circuito cerrado, en la imagen no se aprecia así debido a que hace un recorrido a líneas de ensamble.
- El proceso inicia por pretratamiento de acuerdo con lo antes mencionado y se sigue ese flujo.
- Por complejidad de partes a pintar, todos los equipos cuentan con aplicación manual y automática.

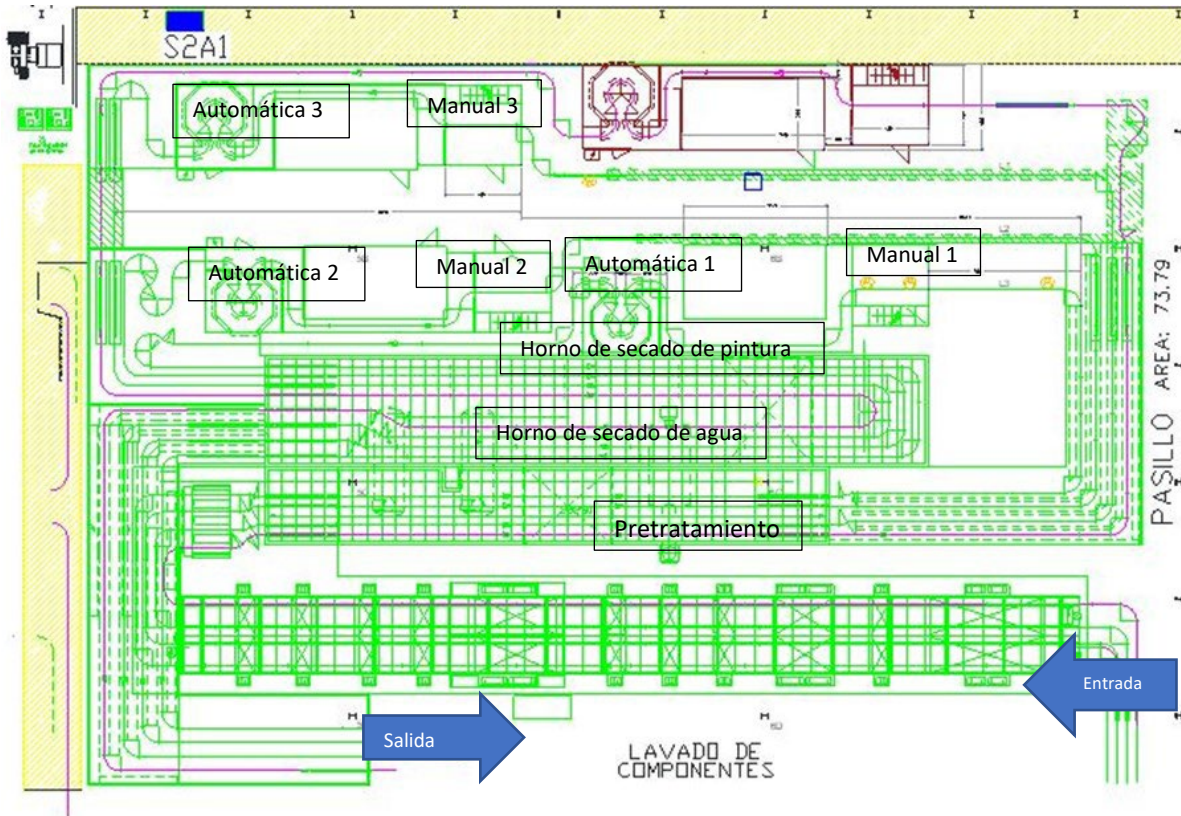


Figura 50 Configuración real de acuerdo con propuesta.  
Elaboración propia

La capacidad de cada cadena es variable, debido a que, al pintar piezas más grandes, la capacidad se reduce a la mitad. Una cadena tiene capacidad de pintar  $n$  números redondeados 3.7 millones de piezas anuales con una eficiencia de 75 % y con piezas grandes 1.85 millones de piezas anuales a 75 % de eficiencia.

La cuarta cadena se diseña con el mismo estándar y la capacidad se definirá de acuerdo con producto que se asigne pintar.

Siguiendo el resultado de pruebas donde se determina que un proceso de doble capa de pintura en aplicación en fresco es posible, se considera entonces dos equipos de aplicación de pintura automática en serie en espacio disponible.

En la Figura 51, se elimina etiquetas de indicación de etapas de procesos y se agrega equipo de aplicación de pintura en serie, haciendo un desvío de recorrido

de cadena de tal modo que se genere un secado previo (sin uso de horno) de la primera capa antes de pasar a la segunda capa. Esto le proporciona a la planta la capacidad de pintar con especificación de resistencia al intemperismo la cantidad de 3.7 millones de piezas anuales.

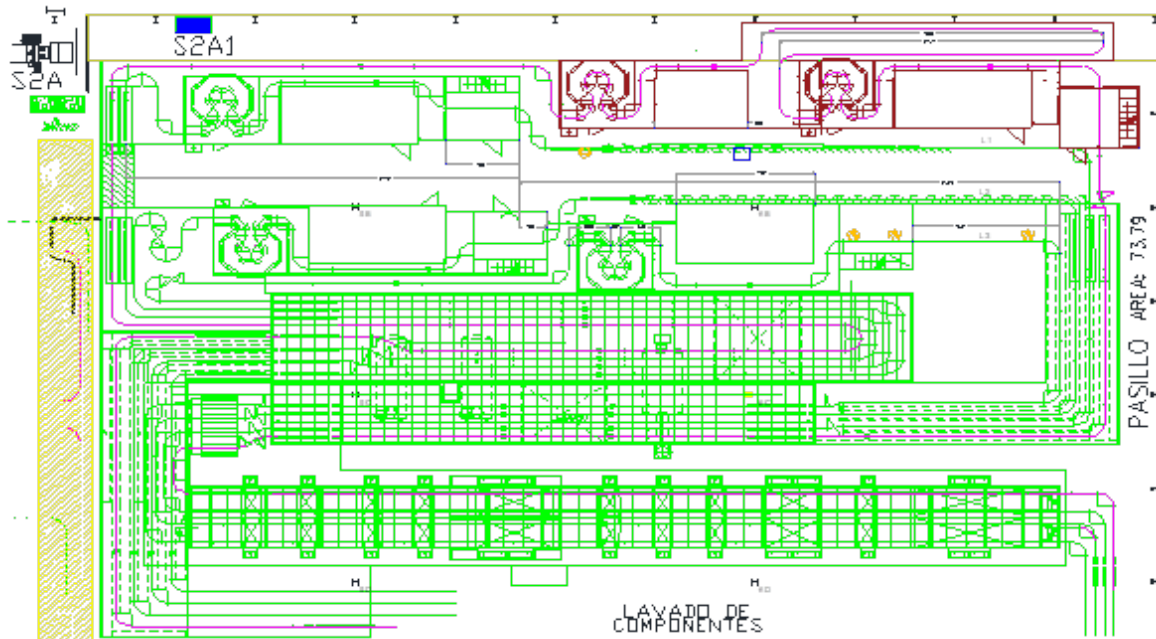


Figura 51 Lay Out de implementación de proceso de doble capa en espacio disponible.  
Elaboración propia

## CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados del diseño de experimentos (DOE) realizado, considerando los dos factores "tipo de pintura" a tres niveles y "aditivo" a dos niveles y teniendo como variable de respuestas al "avance de corrosión" y "corrosión general" se encontró que el DOE cumple con residuos ajustados a una regresión lineal, que son aleatorios como se esperaba en una gráfica de residuales vs. valores ajustados y que no presentan tendencias ascendentes, descendentes o patrones de comportamiento que señalen la dependencia de los residuos. Por lo tanto, se validan los resultados del DOE para ser utilizados en validar las dos hipótesis planteadas.

Para la variable de respuesta "corrosión general" se encontró que ambos factores "tipo de pintura" y "aditivo" no muestran diferencia en la corrosión general observando un valor de cero en todos los experimentos realizados.

Para la variable de respuesta "avance de corrosión" se estableció que el factor "tipo de pintura" tiene un  $p$ -valor=0.012 y  $\alpha=0.05$ , por lo que se puede decir que el tipo de pintura genera una diferencia significativa en esta variable, mientras que para el factor "aditivo" se encontró un  $p$ -valor=0.09 y  $\alpha=0.05$ , por lo que se determinó con base a los criterios indicados que el "aditivo" no genera diferencia significativa en la variable de respuesta "avance de corrosión".

Analizando los efectos principales e interacción de las variables del DOE ejecutado para la variable de respuesta "avance de corrosión" se encontró que la pintura primaria tipo 795 SIN aditivo es la mejor opción en la modificación del proceso de pintado, por lo que es posible sustentar su factibilidad técnica de escalarlo a nivel industrial.

La capa superior de ambas propuestas cumple satisfactoriamente las pruebas de resistencia al intemperismo por irradiación de luz Xenón, pues no hay cambios

significativos en brillo y color, por lo que para la selección de material intervendrán factores como servicio y precio.

Este trabajo también ha demostrado la factibilidad técnica de realizar el cambio de configuración de un proceso de aplicación de pintura de una capa a un proceso de dos capas usando el método *wet-to-wet*, lo que permitirá la aplicación de una pintura epóxica como recubrimiento protector a la corrosión y de una pintura base poliuretano como recubrimiento protector a la irradiación de luz para mantener las características de color y brillo.

## RECOMENDACIONES

Durante mi experiencia profesional me ha tocado la estabilización de proceso de pintura por electrostática que estaba operando durante dos años, la actualización de un proceso de pintura de más de 20 años operando, el arranque de un proceso de pintura por E-Coat y la instalación de una línea de E-coat nueva. Es por eso por lo que afirmo que un proceso de pintura tiene un alto valor de inversión, pero su proceso continuo y robusto, se debe establecer controles de frecuencia alta, capacitación y monitoreo, las herramientas de control estadístico de procesos son muy recomendables y en algunos casos obligatorias. Los procesos de evaluación de corrosión son tardados, desde 6 semanas hasta 10 semanas de prueba sin considerar la disponibilidad de equipos de prueba, así como sus costos. Es por eso que se recomienda establecer un DOE completo para el establecimiento de proceso y materiales de uso, recabar la información de corrida y controlar el factor humano para mitigar posibles errores experimentales. También el uso de panel estándar (usualmente ACT) para descartar materia prima y hasta pretratamiento de fosfato de zinc.

Los factores que recomiendo cuidar.

- Productos químicos y materiales de pintura.
- Control de proceso, condiciones de prueba.
- Mantenimiento de equipo, y filtros.

No obstante que se pueda tener el mejor químico y equipo, pero si no hay un buen control de proceso, el resultado no es del todo favorable, aplica cuando cambias cualquier condición por otras.

En el Anexo A se muestra un ejemplo de documento de control de procesos de pretratamiento. Las frecuencias se establecen de acuerdo con la variabilidad de los resultados, el uso de dosificadores automáticos es válido, dependiendo los recursos de la compañía se puede colocar medidores de conductividad y pH en cada baño.



Control de energéticos y desechos como agua, luz, gas, químicos y desechos además de controlar consumos excesivos, pueden arrojar información de anomalías de proceso.

Controles y monitoreos de temperatura, flujos de aire, diferencial de presión de aire y humedad en proceso es importante para confirmar el buen funcionamiento de los equipos como manejadora de aire UMA, filtros, Boiler, Chiller, etc. Además, que garantizan uniformidad en aplicación de pintura.

## **APORTACIÓN DE LA TESIS**

Cuando una compañía tiene cliente con requerimientos especiales, en este caso resistencia al intemperismo, dentro de sus opciones son, invertir para cubrir el requerimiento o asignar el proceso con proveedor externo. En un estudio Make/Buy, una característica significativa es el conocimiento y experiencia de elaborar un proceso dentro de instalaciones, cuando no se tiene, se rechaza el proyecto o se realiza externo. El presente proyecto aporta información acerca de métodos de aplicación, variedades de pintura, pruebas a realizar y métodos de evaluación, así como el uso de herramientas estadísticas para toma de decisiones. Los procesos de pintura automotriz están principalmente establecidos para dos áreas específicas del vehículo, principalmente la carrocería, resaltando las líneas del diseño y que sea duradero, por supuesto que la parte inferior, el chasis, debe verse pulcro. Este trabajo de investigación ha realizado una recopilación del estado del arte de ambos requerimientos para un punto intermedio, tomando en cuenta las diversas tecnologías de materiales, tecnología de aplicación y su tratamiento previo de piezas. Este trabajo además de presentar el conocimiento generado con investigación aplicada y las pruebas experimentales realizadas incluye el conocimiento de tecnología específica de fabricantes y la experiencia de más de 15 años en uso y control de procesos de pintura.

## **APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS**

Como se estableció en la Introducción, la corrosión genera una pérdida de \$2.5 billones de dólares, los procesos de pintura generan un gasto energético a una compañía de 60 % del total consumido por una planta de producción. Es importante establecer los métodos adecuados de aplicación de pintura y los métodos de evaluación de desempeño de la aplicación de pintura. Este documento explica el tipo de ambientes a los que se expone y requerimientos y formas para prolongar el efecto de corrosión. Entender cuáles son las causas y orientar las acciones. El proceso propuesto presenta como aportación un ahorro energético, pero también un proceso más amigable con el medio ambiente ya que no requiere de procesos contaminantes o de mayor requerimiento energético disminuyendo su huella de carbono y emisión de gases efecto invernadero a la atmósfera y emisión de VOCs por uso efectivo de recubrimientos en pintado de autopartes. Una última aportación social de este trabajo es la que ha permitido hacer más eficiente la operación de pintado de autopartes en la empresa con un proceso mejorado, garantizando los empleos del personal contratado.

## REFERENCIAS

- Begum, A. A., Rane, A. V., & Kanny, K. (2020). Applications of compatibilized polymer blends in automobile industry. In A. Ajitha, & T. Sabu (Hrsg.), *Compatibilization of polymer blends: micro and nano scale phase morphologies, interphase characterization and properties* (S. 563-593). Durban: Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816006-0.00020-7>
- Bernal, L. (2018). Principios básicos de e-coat. *Cursode capacitación personal de ZF* (S. 5). Zapopan: Axalta Coatings.
- Chang, J.-S. (1995). *Handbook of electrostatic processes*. Hamilton, Ontario: McMaster University.
- Chunyan, Z., Bin, L., Baoxing, Y., Xiaopeng, L., Yong, W., & Tao, Z. (2019). Influence of surface pretreatment on phosphate conversion coating on AZ91 Mg alloy. *Surface & Coatings Technology*, 359, 414-425.
- Doerre, M., Hibbitts, L., Patrick, G., & Akafuah, N. K. (2018). Advances in automotive conversion coatings during pretreatment of the body structure: a review. *Coating*, 1-16.
- Donofrio, J. (2000). Zinc phosphating. *Metal Finishing*, 98(6), 64-81. doi:10.34049/bcc.53.2.5343
- Giudice, C. A. (2009). *Tecnologías de pinturas y recubrimientos*. Buenos Aires, Argentina: Universidad Tecnológica Nacional (Argentina).
- Horiuchi, T., Nomoto, M., & Nanaumi, K. (1995). Reaction of amides with epoxy compounds and its application. *Japan Thermosetting Plastic Industry Association*, 199-206.
- Ivanova, D. (2021). Surface treatment of electro galvanized steel in modified zinc phosphating solutions. *Bulgarian Chemical Communications*, 53(2), 216-227. doi:10.34049/bcc.53.2.5343
- Jorge, C. (2002). Iluminación artificial. *Instalaciones 2*, 130.
- Kárpáti, L., Ganyecz, A., & Nagy, T. (2020). Synthesis and characterization of isophorondiamine-based oligoamides: catalytic effect of amides during the curing. *Polymer Bulletin*, 4655-4678. doi:10.1007/s00289-019-02987-6

- Kelly, B., Shaw, A., & Kelly, R. G. (2006). What is corrosion? *The Electrochemical Society Interface*, 24-26. doi:10.1149/2.F060611F
- Koch, G., Varney, J., Neil, T., Moghissi, O., Melissa, G., & Payer, J. (2016). *International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study*. Nace International. Dublin: Nace International Impact. Von <http://impact.nace.org/documents/Nace-International-Report.pdf> abgerufen
- Leitz, C. (2007). Life cycle cost modeling of automotive paint systems. *Thesis of Master of Science in Electrical Engineering & Computer Science*, 1-89. Massachusetts: MIT.
- Li, G. (2021). Comparative study on transmission performance of manganese phosphate coated gears. *Coatings*, 1-12.
- Milosev, I., & Frankel, G. (2018). Review: conversion coatings based on zirconium and/or titanium. *Journal of The Electrochemical Society*, 127-144.
- Mohan, P. (2013). A critical review: the modification, properties, and applications of epoxy resins. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 107-125.
- Nanoscience, N. C. (2022). *Electron nanoscopy instrumentation facility*. Von University of Nebraska: <https://ncmn.unl.edu/enif/microscopy> abgerufen
- Ou, B., Wang, Y., & Lu, Y. (2021). A review on fundamentals and strategy of epoxy-resin-based anticorrosive coatings materials. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 60(6), 601-625.
- Pasmanter, N., & Munakomi, S. (2019). Physiology, color perception. *National Center for Biotechnology Information*.
- Pereyra, C. A. (2009). *Tecnología de pinturas y recubrimientos*. Buenos Aires: Universidad Tecnológica de Nacional (Argentina).
- Qin, J. (2020). Sunlight tracking and concentrating accelerated weathering test applied in weatherability evaluation and service life prediction of polymeric materials: A review. *Polymer Testing*, 1-19.
- Rakshit, P., Joshi, N., Jain, R., & Shailesh, S. (2016). Synthesis and characterization of polyurea resin for dielectric coating application. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 1683-1692.

- Rascio, V. (1989). *Propiedades y control de calidad de pinturas y recubrimientos*. Buenos Aires: CIDEPINT.
- Reza, M. (2019). Numerical investigation of electrostatic spray painting transfer process for vehicle coating. *SAE International*, 1-18.
- Rustico Jr, E. Z., Matias, A. C., & Grepo, L. C. (2015). Manpower utilization in the powder coating production of a powder coating company. *Procedia Manufacturing*, 332-339.
- Santana, J., Cardoso, E., Triboni, E., & Politi, M. (2021). Polyureas versatile polymer for new academic and technological applications. *Polymer*, 1-44.
- Schulz, D. (2013). Painting trends in the automotive industry. *Organic Finishing*, 38-40.
- Tekeshita, Y., Sawada, Y., Takao, H., & Watanuki, Y. (2012). Influence of air-cooling time on physical properties of thermoplastic polyester powder coatings. *Progress in Organic Coatings*, 584-589.
- Toda, K., Salazr, A. J., & Saito, K. (2013). *Automotive painting technology: a monozukuri-hitozukuri perspective*. (K. Toda, A. J. Salazr, & K. Saito, Hrsg.) Owariasahi: Springer. doi:10.1007/978-94-007-5095-1
- Zhanbo, X., Qing-Shan, J., Xiaohong, G., & Jianxiang, S. (2013). Smart management of multiple energy systems in automotive painting shop. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 10(3), 603-614. doi:10.1109/TASE.2012.2236554
- Zhenhai, X., Gerald, A., & Yi, Q. (2015). Painting of aluminium panels: state of the art and development issues. (S. 1-7). Glasgow: EDP Sciences.
- Zhongyan, D., Wen, S., Jihu, W., Changle, Y., Dayang, Y., & Jian, L. (2016). The review of powder coatings. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 54-59.

## **ANEXO A**

Nombre de Compañía INGENIERIA DE MANUFACTURA	PROCESO: MAQUINA: HOJA DE PARÁMETROS N°:	RANGO	Primer turno hora de maestro						Segundo turno hora de maestro						Tercer turno hora de maestro						SAUDAS DE ALMACEN					
			Tuñel 1	Tuñel 2	Tuñel 1	Tuñel 2	Tuñel 1	Tuñel 2	Tuñel 1	Tuñel 2	Tuñel 1	Tuñel 2	Tuñel 1	Tuñel 2	Tuñel 1	Tuñel 2	Tuñel 1	Tuñel 2	Tuñel 1	Tuñel 2	Tuñel 1	Tuñel 2				
<b>PARAMETROS A CONTROLAR</b>																										
Alcalinidad Libre	12 Puntos min. / C/turno																									
Presión	0.5-1.5 kg/cm2 / C/turno																									
Temperatura	60° C min. / C/3 horas																									
Grasas y/o Aceites	4.0 mV max. / Semanal																									
Glucosado	>10 gr/l / Semanal																									
pH de línea	11.5 Puntos min. / C/3 horas																									
<b>ETAPA 2 ENVIAGUE 1</b>																										
Potencial Hidrogeno (pH)	10-12 Puntos / C/turno																									
Conductividad	0.2-1.2 kg/cm2 / C/turno																									
<b>ETAPA 3 DESNGRASE 2</b>																										
Alcalinidad Libre	12 Puntos min. / C/turno																									
Temperatura	0.5-1.5 kg/cm2 / C/turno																									
Grasas y/o Aceites	60° C min. / C/3 horas																									
Glucosado	4.0 mV Max. / Semanal																									
pH de línea	>10 gr/l / Semanal																									
<b>ETAPA 4 ENVIAGUE 2</b>																										
Conductividad	5000-6500 cm. / C/turno																									
Potencial Hidrogeno (pH)	9-11 Puntos / C/3 horas																									
Temperatura	40-55° C / C/3 horas																									
<b>ETAPA 5 ENVIAGUE 3</b>																										
Potencial Hidrogeno (pH)	7-9 Puntos / C/turno																									
Conductividad	1000-6500 cm. max. / C/turno																									
Presión	0.8-1.5 kg/cm2 / C/turno																									
<b>ETAPA 6 ACTIVADO</b>																										
Potencial Hidrogeno (pH)	9-11 Puntos / C/3 horas																									
Conductividad	5000-6500 cm. max. / C/3 horas																									
Temperatura	40-55° C / C/3 horas																									
<b>ETAPA 7 FOSFATO</b>																										
Presión	0.4-0.8 kg/cm2 / C/turno																									
Temperatura	40-55° C / C/3 horas																									
Acidez libre	2.0-3.0 ml. / C/3 horas																									
Acidez Total	25-30 ml. / C/3 horas																									
Acelerador	2.0-2.5 ml. / C/3 horas																									
Filigran libre	100-160 ppm / C/ Mes																									
Peso deposito	2-5 gr/m2 / C/ Mes																									
Contenido de Manganeso	0.7-1.5 gr/ft. / Semanal																									
Contenido de Niquel	0.7-1.2 grs/ft. / Semanal																									
Contenido de Zinc	0.7-1.2 grs/ft. / C/turno																									
Índice c/Cono Imhoff	0-3.5 ml/l. / Diario																									
<b>ETAPA 8 ENVIAGUE 4</b>																										
Potencial Hidrogeno (pH)	5-7 Puntos / C/3 horas																									
Conductividad	5000-6500 cm. max. / C/turno																									
Presión	1.0-2.0 kg/cm2 / C/turno																									
<b>ETAPA 9 ENVIAGUE 5</b>																										
Conductividad	1000-6500 cm. max. / C/turno																									
Potencial Hidrogeno (pH)	9-11 Puntos / C/turno																									
Presión	1.0-2.0 kg/cm2 / C/turno																									
<b>ETAPA 10 PASIVADO</b>																										
Potencial Hidrogeno (pH)	4.4-4.8 Puntos / C/3 horas																									
Puntos Activos	2.5-3.5 Puntos / Diario																									
Conductividad	600-1500 cm. max. / C/turno																									
Presión	0.4-0.8 kg/cm2 / C/turno																									
<b>ETAPA 11 ENVIAGUE DI</b>																										
Conductividad	50 uS/cm max. / C/turno																									
Presión	0.2-1.3 kg/cm2 / C/turno																									
Conductividad	31-156 uS/cm max. / C/turno																									
<b>FRMA DEL OPERADOR EN CADA INSPECCION</b>																										
<b>FRMA DEL SUPERVISOR EN CADA INSPECCION</b>																										

Numero y revisión de documentos que establecen los parámetros (No. de máquina)

Fecha: \_\_\_\_\_  
 Numero de folio: \_\_\_\_\_  
 Firma o sello Supervisor: \_\_\_\_\_

Las determinaciones de grasas, puntos activos, níquel, manganeso y glucosado se realizan y registradas los días miércoles de cada semana. Las determinaciones de peso de deposito y filigran se registran el primer día de cada mes.