



Análisis y Desarrollo de Estrategias de Calidad para la Optimización del Proceso de Pintura: Caso de Estudio en un Proveedor de Metalmecánica

Nombre de los autores:

Geny Esperanza Reyes Pico

Universidad EAN

Facultad de Ingeniería

Gerencia de la cadena de Abastecimiento

Bogotá, Colombia

08/09/2025

**Análisis y Desarrollo de Estrategias de Calidad para la Optimización del Proceso de
Pintura: Caso de Estudio en un Proveedor de Metalmecánica**

Geny Esperanza Reyes Pico

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Magister en Cadena de Suministros

Director (a):

Paula Echeverry Perez

Modalidad:

Artículo de Investigación

Facultad de Ingeniería

Gerencia de la cadena de Abastecimiento

Bogotá, Colombia

08/09/2025

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del director del trabajo de grado

Ciudad, día/mes/año

A mi familia, por su paciencia, comprensión y apoyo incondicional durante este proceso. Gracias por acompañarme en cada etapa, incluso en los momentos de ausencia y sacrificio que implicó este logro. Su capacidad de adaptarse, de entender que los caminos profesionales a veces exigen decisiones difíciles, ha sido fundamental para alcanzar esta meta. En nuestras diferencias encontré fortaleza, y en su respaldo, el impulso necesario para continuar.

Agradecimientos

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a Schweitzer Engineering Laboratories Colombia (SEL Colombia) por permitir el uso de este proyecto de mejora como base para el desarrollo de mi trabajo de grado. Esta colaboración fue clave para vincular la teoría con la práctica, y para generar un aporte real al proceso de calidad en la industria metalmecánica.

Agradezco especialmente al equipo del área de calidad de SEL, por su acompañamiento cercano, su orientación técnica y su disposición permanente para compartir conocimientos. Su participación fue fundamental para que el estudio se desarrollara de manera organizada, rigurosa y alineada con los estándares exigidos por la compañía.

Extiendo también mi gratitud a la empresa objeto de estudio, por abrir sus puertas y permitir la ejecución del diagnóstico en campo. El aprendizaje obtenido durante esta experiencia no solo contribuye al fortalecimiento de sus procesos internos, sino que representa una oportunidad de mejora para toda la cadena de suministro, impactando positivamente en la entrega de productos con mayor confiabilidad y calidad.

Finalmente, reconozco el valor de cada persona que, desde su rol, aportó a la construcción de este trabajo. Este logro es el resultado de un esfuerzo colectivo, y refleja el compromiso compartido con la excelencia operativa y la mejora continua.

Resumen

Este estudio aborda la optimización del proceso de aplicación de pintura en gabinetes metálicos fabricados por un proveedor colombiano de SEL Colombia, a partir de un caso de no conformidad por baja adherencia del recubrimiento. El objetivo general fue mejorar la adherencia de la pintura mediante el diagnóstico técnico del proceso y la implementación de estrategias de calidad alineadas con los principios de World Class Manufacturing (WCM).

La metodología empleada fue de tipo caso de estudio, de diseño no experimental y corte transversal, orientado a diagnosticar y estabilizar el proceso de pintura. Se utilizaron herramientas como el diagrama de Ishikawa, los cinco porqués y la metodología 8D, complementadas con observación directa, la revisión de documentos internos de la empresa, entre ellos procedimientos (códigos PRD-I) y formatos operativos (códigos PRD-F y MTTO-CRN), tales como PRD-I-047, PRD-I-048, PRD-F-002, PRD-F-018 y MTTO-CRN-001, donde fueron evaluados el 100 % del lote 24020041 (censo), correspondientes a 45 gabinetes metalmecánicos.

Los resultados evidenciaron que la adherencia deficiente se debía a una combinación de fallas en el pretratamiento químico, uso de pintura vencida, falta de calibración del horno, mantenimiento irregular y escasa formación técnica del personal. Se implementaron acciones correctivas como protocolos ajustados por calibre, control de

titulación diario, reorganización del almacenamiento por fechas de vencimiento, capacitación en la Norma Técnica Colombiana NTC 811 *“Método de ensayo para medir/determinar la adhesión de un recubrimiento mediante el ensayo de cinta”*, y mantenimiento preventivo documentado.

La discusión confirma que estas acciones permitieron estabilizar el proceso, mejorar la trazabilidad y reducir la variabilidad en los resultados de adherencia. Posteriormente, se realizaron pruebas de validación en los laboratorios de la filial en México, incluyendo ensayos mecánicos y de cámara salina bajo condiciones controladas (35 °C, pH 6.6, flujo de 1.6 L/min, duración de 24 horas). Los resultados demostraron que las muestras de pintura RAL 7032 y RAL 7035 texturizado alcanzaron una clasificación de adherencia 5B, correspondiente al 100% de adherencia según la escala ASTM D3359, sin presencia de ampollamiento (NB) ni avance de corrosión (10), lo que confirma la efectividad de las mejoras implementadas.

Palabras clave:

Adherencia de pintura, proceso de curado, pretratamiento químico, mejora continua, World Class Manufacturing, control de calidad, metalmecánica.

Abstract

This study focuses on optimizing the paint application process for metal cabinets manufactured by a Colombian supplier of SEL Colombia, following a non-conformity case due to poor coating adhesion. The main objective was to improve paint adhesion through a technical diagnosis of the process and the implementation of quality strategies aligned with World Class Manufacturing (WCM) principles.

Applied study, designed as a case study with a non-experimental and cross-sectional approach, aimed at diagnosing and stabilizing the painting process. Tools such as the Ishikawa diagram, the Five Whys technique, and the 8D methodology were utilized, complemented by direct observation, technical interviews, and the review of internal company documents, including procedures (PRD-I codes) and operational forms (PRD-F and MTTO-CRN codes), such as PRD-I-047, PRD-I-048, PRD-F-002, PRD-F-018, and MTTO-CRN-001.

The results showed that deficient adhesion was caused by a combination of issues, including failures in chemical pretreatment, the use of expired paint, lack of oven calibration, irregular maintenance practices, and insufficient technical training of personnel. Corrective actions were implemented, such as thickness-adjusted process protocols, daily titration control, reorganized storage based on expiration dates, training aligned with the Colombian Technical Standard NTC 811 "Test method for measuring/determining coating adhesion using the tape test" and documented preventive maintenance.

The discussion confirms that these actions stabilized the process, improved traceability, and reduced variability in adhesion results. The conclusions validate the proposed hypotheses, address the specific objectives, and suggest future opportunities such as implementing IoT sensors and accelerated aging tests to strengthen process control.

Keywords:

Paint adhesion, curing process, chemical pretreatment, continuous improvement, World Class Manufacturing, quality control, metalworking.

Introducción

La calidad en los procesos industriales representa un pilar fundamental para la competitividad y sostenibilidad de las organizaciones, especialmente en sectores como el eléctrico y metalmecánico, donde la confiabilidad de los productos está directamente relacionada con su desempeño técnico, durabilidad y cumplimiento normativo (Evans, J. R et al, 2020). En este contexto, el presente estudio se enmarca en la necesidad de optimizar el proceso de aplicación de pintura en gabinetes metálicos fabricados por un proveedor colombiano de Schweitzer Engineering Laboratories Colombia SAS (SEL Colombia), con el fin de garantizar la adherencia del recubrimiento conforme al estándar ASTM D3359, *Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test* (ASTM International, 2021).

La adherencia de la pintura en componentes metálicos no solo cumple una función estética, sino que constituye una barrera protectora contra la corrosión, el desgaste y otros factores ambientales que pueden comprometer la funcionalidad del producto. Diversos estudios han abordado esta problemática, señalando que factores como la preparación de superficie, las condiciones ambientales y los parámetros técnicos de aplicación son determinantes para la calidad del recubrimiento (Mazumder et al, 2020); (Singh et al, 2019). Sin embargo, persisten desafíos en la implementación de controles efectivos que aseguren la consistencia del proceso, especialmente en entornos productivos con variabilidad operativa.

En el caso específico de la empresa objeto de estudio, se evidenció un problema de calidad en un lote de gabinetes destinados a exportación, donde se encontraron niveles de adherencia de pintura inferiores al estándar mínimo de 5B exigido por SEL Colombia. Esta clasificación proviene de la norma ASTM D3359, la cual utiliza un sistema compuesto por una letra y un número para describir el comportamiento del recubrimiento frente al ensayo de cinta. La letra "B" indica que la evaluación se realizó mediante el Método B, también conocido como cross-cut, en el que se efectúa una rejilla de cortes controlados sobre la película de pintura, se aplica una cinta adhesiva normalizada y luego se retira de forma rápida a un ángulo cercano a 180°. Posteriormente, se inspecciona la zona para determinar el grado de desprendimiento del recubrimiento. El número, que varía entre 0 y 5, refleja la magnitud de este desprendimiento: una calificación 5B corresponde a la adherencia máxima, sin pérdida visible de pintura, mientras que valores decrecientes (4B, 3B... hasta 0B) indican niveles progresivamente menores de adherencia.

La detección de valores por debajo del estándar requerido llevó a la apertura de un caso de calidad y motivó la articulación de un esfuerzo conjunto entre ambas organizaciones para revisar y optimizar el proceso de pintura. Esta situación se convirtió en una oportunidad estratégica para aplicar metodologías de mejora continua, como el análisis de causa raíz y la metodología 8D, orientadas a identificar de manera sistemática las causas subyacentes del problema y plantear soluciones sostenibles (Andersen, B. & Fagerhaug, T., 2006).

Desde el punto de vista científico, el estudio se ubica en el campo de la gestión de calidad y mejora continua, con énfasis en la aplicación de principios de World Class Manufacturing (WCM), que promueven la excelencia operativa a través de la estandarización de procesos, la eliminación de defectos y el empoderamiento del talento humano (Schonberger, 1986). La literatura especializada destaca que la implementación de WCM en procesos de pintura industrial exige un control riguroso de variables como la limpieza de superficie, la temperatura, la humedad, la viscosidad de la pintura y los métodos de aplicación (Yamashina, 2000); (Roberge, 2008). Estos elementos deben ser monitoreados y ajustados de forma sistemática para garantizar la adherencia del recubrimiento y evitar fallas como el desprendimiento, la descamación o el burbujeo.

En este sentido, la hipótesis central de la investigación plantea que la optimización del proceso de pintura, mediante el diagnóstico técnico y la aplicación de metodologías de mejora continua, permitirá mejorar significativamente la adherencia del recubrimiento en los gabinetes metálicos, cumpliendo con los estándares exigidos por SEL Colombia. Esta hipótesis se fundamenta en estudios previos que demuestran la eficacia de herramientas como el diagrama de Ishikawa, los cinco porqués y el enfoque Genchi Genbutsu para comprender el problema en el lugar donde ocurre (Ohno, 1988).

Objetivos

Objetivo General

Optimizar el proceso de aplicación de pintura en la empresa objeto de estudio para mejorar la adherencia en los gabinetes de control y protección, asegurando el cumplimiento de los estándares de calidad de SEL Colombia y alineándose con los principios de World Class Manufacturing.

Objetivos Específicos

- Diagnosticar el estado actual del proceso de aplicación de pintura en La empresa objeto de estudio, mediante un análisis detallado de las condiciones operativas de la línea de pintura, los procedimientos utilizados, los materiales aplicados y los parámetros técnicos (temperatura, humedad, tiempo de secado, entre otros). Se evaluará el grado de cumplimiento con los estándares internos de calidad y se identificarán posibles deficiencias que puedan estar afectando la adherencia del recubrimiento.
- Identificar oportunidades de mejora en los materiales, técnicas de aplicación y condiciones del proceso de pintura con el fin de garantizar una adherencia óptima del recubrimiento. Se explorarán alternativas en la selección de pinturas,

pretratamientos de superficie, métodos de aplicación, así como factores ambientales que puedan influir en la calidad del acabado.

- Proponer un plan de optimización del proceso de pintura, que contemple acciones concretas para corregir las deficiencias detectadas. Este plan incluirá recomendaciones sobre la implementación de nuevas tecnologías, ajustes en los procedimientos de aplicación, capacitación del personal, mejoras en la supervisión y control de calidad, así como estrategias para minimizar la variabilidad del proceso y reducir el riesgo de futuros incumplimientos.

Pregunta de investigación

¿Cómo puede la empresa objeto de estudio optimizar su proceso de aplicación de pintura para garantizar la adherencia en los gabinetes de control y protección, cumpliendo con los estándares de calidad de SEL Colombia?

Hipótesis

Hipótesis 1 (técnico-operativa):

La adecuada preparación de la superficie, el control de las condiciones de proceso y la estandarización de los parámetros de aplicación permiten alcanzar y mantener la conformidad del recubrimiento con el criterio $\geq 5B$ establecido por la ASTM D3359/NTC 811 (ASTM International, 2021) en los gabinetes metálicos evaluados.

Hipótesis 2 (técnico-diagnóstica):

El proceso actual de pintura presenta deficiencias técnicas en el pretratamiento, control de proceso y estandarización operativa que explican la no conformidad en los resultados de adherencia. Estas deficiencias pueden ser identificadas y corregidas mediante la aplicación estructurada de metodologías de mejora continua, como el análisis de causa raíz, los 5 Porqués y la metodología 8D, permitiendo alcanzar el criterio de adherencia $\geq 5B$ establecido por ASTM D3359/NTC 811 (ASTM International, 2021).

Marco teórico

Fundamentos de la gestión de calidad:

La gestión de calidad constituye un enfoque sistemático para garantizar que los procesos, productos y servicios cumplan consistentemente con los requisitos del cliente y las normativas aplicables. Según (Juran, 1998), la calidad no es un accidente, sino el resultado de una planificación intencional, basada en principios como el enfoque al cliente, la mejora continua, y el liderazgo comprometido. En el contexto industrial, estos principios se traducen en prácticas que buscan minimizar la variabilidad de los procesos, reducir defectos y optimizar el rendimiento. Así, la gestión de calidad va más allá del control final del producto, integrándose en cada etapa del ciclo productivo, desde el diseño hasta la entrega. Su implementación se apoya en normas como la ISO 9001, que promueven un enfoque basado en procesos, la toma de decisiones basada en evidencia y la mejora continua como pilares esenciales. (International Organization for Standardization (ISO), 2015).

Además, la gestión de calidad impulsa una cultura organizacional orientada al aprendizaje, donde se valoran la retroalimentación y la resolución estructurada de problemas. Tal enfoque es crucial para empresas del sector metalmecánico, donde factores como la resistencia a la corrosión, el acabado superficial y la durabilidad de los productos dependen directamente de la calidad de los procesos. La adherencia de la pintura, por ejemplo, no es solo una característica estética, sino un indicador crítico de desempeño, ligado al cumplimiento de estándares técnicos y a la satisfacción del cliente. La gestión de calidad, en este sentido, provee las herramientas para monitorear estos

aspectos, detectar desviaciones y actuar proactivamente ante posibles fallas (Evans, J. R et al, 2020).

World Class Manufacturing y su enfoque en procesos.

El concepto de World Class Manufacturing (WCM) surgió como una respuesta a la necesidad de las empresas industriales de alcanzar niveles superiores de competitividad mediante la excelencia operativa. Según Schonberger, (Schonberger, 1986), el WCM integra principios orientados a la eliminación de desperdicios, la estandarización de procesos y el fortalecimiento del rol del talento humano como base para una producción más eficiente y flexible. Esta metodología integra principios de *just in time*, *total quality management* y mantenimiento productivo total, consolidando una cultura de mejora continua basada en datos y participación de todos los niveles. Más recientemente, Murino (Murino et al., 2022) describen el WCM como un programa de innovación basado en la mejora continua, orientado a la eliminación de todo tipo de pérdidas y desperdicios mediante el involucramiento transversal de todos los niveles y departamentos de la organización.

Uno de los pilares clave de WCM es el enfoque en procesos, lo que implica mapear, controlar y mejorar cada actividad que agrega valor al producto final. En el caso de la aplicación de pintura en gabinetes metálicos, este enfoque exige controlar variables como la limpieza de superficie, las condiciones ambientales, los parámetros de aplicación y los tiempos de secado. El WCM promueve la implementación de estándares rigurosos, auditorías internas y prácticas como el autocontrol del operario para prevenir errores

antes de que se conviertan en defectos. Su adopción permite no solo cumplir con los requisitos del cliente, sino también incrementar la eficiencia, reducir reprocesos y elevar la confiabilidad del proceso (Yamashina, 2000).

Procesos de pintura industrial y control de calidad

El proceso de pintura industrial es una etapa crítica en la fabricación de componentes metálicos, especialmente en sectores como el eléctrico y metalmecánico, donde se exige protección contra la corrosión, durabilidad y presentación estética. Este proceso incluye varias fases, como el pretratamiento de la superficie, la aplicación del recubrimiento y el curado, cada una de las cuales puede impactar directamente en la adherencia final de la pintura. Según (Roberge,, 2008), el desempeño de un recubrimiento está fuertemente condicionado por la preparación de la superficie; esta debe estar limpia y libre de contaminantes, óxidos y aceites para asegurar una adecuada adherencia. El tipo de pintura, los métodos de aplicación (como pulverización electrostática o inmersión) y las condiciones del entorno (temperatura, humedad, ventilación) también son factores determinantes para la calidad del acabado.

En el caso de la empresa objeto de estudio, se ha evidenciado que la adherencia insuficiente podría estar relacionada con variables no controladas durante la aplicación. Estudios demuestran que la viscosidad de la pintura, la presión del aire, la distancia de aplicación y el ángulo del pulverizador son determinantes para el espesor y adherencia del recubrimiento (Mazumder et al, 2020). Así mismo, la temperatura y la humedad del ambiente pueden afectar el secado y la formación de la película protectora.

El control de calidad, por tanto, debe contemplar tantas inspecciones visuales como pruebas técnicas normalizadas. La norma ASTM D3359, por ejemplo, permite medir el grado de adherencia mediante el método de corte en rejilla. Un valor 5B indica que no hubo desprendimiento visible, mientras que valores inferiores alertan sobre un problema potencial. En contextos como el de SEL Colombia, donde se exigen estándares estrictos, un resultado de 3B representa una no conformidad. La implementación de controles estadísticos del proceso (CEP) y el uso de ensayos destructivos y no destructivos pueden ayudar a anticipar y mitigar estas fallas (ASTM International, 2021).

Cohesión, adhesión y fallas del recubrimiento

La adhesión corresponde a la capacidad del recubrimiento para anclarse al sustrato metálico mediante fuerzas físicas y químicas (Biolin Scientific, 2021); mientras que la cohesión describe la resistencia interna del propio recubrimiento para mantenerse íntegro sin fragmentarse (Biolin Scientific, 2021)(Applied Adhesives, 2025). En procesos de pintura industrial pueden presentarse dos tipos de falla: la falla adhesiva, cuando el recubrimiento se separa de la superficie por deficiencias en el pretratamiento, contaminación, insuficiente energía superficial o curado inadecuado (Applied Adhesives, 2025); y la falla cohesiva, cuando el desprendimiento ocurre dentro de la propia película debido a envejecimiento, mala formulación, degradación térmica o curado incompleto. La comprensión de ambos mecanismos es fundamental para interpretar adecuadamente los resultados de pruebas como ASTM D3359/NTC 811 (ASTM International, 2021), que permiten evaluar la estabilidad del anclaje del recubrimiento.

Metodologías de mejora continua: 8D y análisis de causa raíz

La metodología 8D (Eight Disciplines) se ha consolidado como una herramienta efectiva para abordar problemas complejos de calidad, especialmente en el entorno industrial. Su enfoque estructurado permite identificar fallas, contener su impacto inmediato, investigar sus causas profundas y proponer acciones correctivas sostenibles. Cada “disciplina” o etapa del 8D tiene una función específica, comenzando con la formación de un equipo interdisciplinario (D1) y finalizando con el reconocimiento de las contribuciones del grupo (D8). Esta metodología fomenta la documentación del conocimiento adquirido, lo que facilita la prevención de futuras fallas similares (Ford Motor Company, 1995).

Una de las etapas más críticas es la D4, dedicada al análisis de causa raíz. Este paso requiere herramientas que faciliten el pensamiento lógico y la exploración profunda del problema. El diagrama de Ishikawa o de “espina de pescado” es una técnica ampliamente usada para identificar causas agrupadas en categorías como método, material, mano de obra, medio ambiente, maquinaria y medición. Otra técnica muy utilizada es la de los cinco porqués, donde se cuestiona repetidamente el “por qué” de un problema hasta llegar a su causa fundamental. Estas herramientas permiten comprender no solo qué ocurrió, sino por qué ocurrió y cómo evitar que se repita (Andersen, B. & Fagerhaug, T., 2006).

En el caso de la empresa objeto de estudio, aplicar un 8D ante el problema de baja adherencia permitiría registrar correctamente las evidencias, involucrar a todos los responsables del proceso y evitar soluciones “parche” o reactivas. Por ejemplo, si la

causa raíz está en un mal almacenamiento de la pintura que altera su viscosidad, la solución no debe limitarse a cambiar de proveedor, sino a rediseñar el sistema de almacenamiento y monitoreo. Las acciones correctivas (D5) y preventivas (D7) deben ser verificadas y sostenidas en el tiempo para asegurar una mejora real en la calidad del proceso (Evans, J. R et al, 2020).

Variables críticas para el diagnóstico del proceso de pintura

Para realizar un diagnóstico efectivo del proceso de pintura, es indispensable identificar las variables críticas que impactan en la adherencia del recubrimiento. Estas variables se agrupan en tres dimensiones clave: preparación de la superficie, condiciones del proceso de aplicación y ambiente de trabajo. En cuanto a la superficie, la presencia de contaminantes como polvo, aceites o residuos de soldadura puede impedir la adecuada fijación de la pintura. El tipo de tratamiento previo ya sea químico o mecánico, influye directamente en el nivel de anclaje del recubrimiento. Según (Singh et al, 2019), una superficie mal preparada puede reducir hasta en un 40% la eficacia de la adherencia, incluso si el resto del proceso es técnicamente correcto.

En relación con el proceso de aplicación, los factores más determinantes son el tipo de pintura (base solvente o base agua), el método de aplicación, la viscosidad, el espesor por capa, la presión de atomización, y la velocidad y ángulo de movimiento del aplicador. Además, el tiempo de secado entre capas y el proceso de curado final afectan la integridad del recubrimiento. Si estas variables no se controlan bajo parámetros

normalizados, se genera una dispersión en la calidad del acabado que puede derivar en fallas como descamación, burbujeo o falta de cubrimiento (Mazumder et al, 2020).

El ambiente también juega un papel relevante, particularmente en fábricas sin clima controlado. Factores como la humedad relativa, la temperatura ambiente, la ventilación o la presencia de partículas en suspensión afectan el secado y la adhesión. Algunos estudios recomiendan mantener una humedad inferior al 60% y temperaturas entre 18 y 25 °C para procesos de pintura en polvo o electrostática. Ignorar estas condiciones puede invalidar los controles de calidad implementados aguas abajo. Por ello, un diagnóstico riguroso debe considerar datos medidos y no solo observaciones, permitiendo generar un plan de mejora bien fundamentado (Roberge,, 2008)

Relación entre adherencia de pintura, normativas y estándares

La adherencia de pintura no es únicamente un indicador de calidad visual o estética, sino una característica funcional regulada por estándares internacionales. En contextos industriales exigentes, la falta de adherencia puede derivar en la exposición del metal base, acelerando procesos de corrosión, fallas eléctricas y deterioro prematuro. Por ello, normas como ASTM D3359, ISO 2409 e ISO 4624 establecen metodologías estandarizadas para evaluar esta propiedad. Cada norma define técnicas de prueba, clasificación de resultados y criterios de aceptación, lo que garantiza uniformidad en los procesos de inspección y aceptación de productos (ASTM International, 2021), (International Organization for Standardization (ISO), 2015).

Tabla 1

Comparación resumida de métodos de adherencia por corte (ASTM D3359 vs ISO 2409)

Aspecto	ASTM D3359 (Método A/B)	ISO 2409
Sustratos típicos	Desarrollada para metales; se usa el ensayo de cinta sobre cortes practicados en la película	Aplica en diversos sustratos; prueba de corte en rejilla con evaluación visual
Técnica	A (X-cut): corte en X + cinta. B (cross-cut): rejilla (6 u 11 cortes por dirección) + cinta	Cross-cut (rejilla) + cinta, con procedimiento y espaciado definidos por la norma
Espesor recomendado (método de rejilla)	Para Método B se recomienda $\leq 125 \mu\text{m}$ (5 mils), salvo acuerdo expreso	Define criterios por clase de recubrimiento/sustrato; enfoque similar de rejilla
Escala de calificación	5B (sin desprendimiento) → 0B (fallo severo)	0 (sin desprendimiento) → 5 (fallo severo)
Naturaleza del resultado	Comparativo/semicuantitativo (verifica adecuación; no es fuerza de adhesión absoluta)	Comparativo/semicuantitativo (criterios visuales normalizados)

Nota. Resumen elaborado a partir de las descripciones de alcance, método y clasificación de ASTM D3359 *Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test*; ediciones 2022/23 usan *Rating Adhesion by Tape Test*. (ensayo de cinta con Métodos A y B) y ISO 2409 (corte en rejilla).

En particular, el estándar ASTM D3359 evalúa la resistencia del recubrimiento al desprendimiento mediante cortes en rejilla y aplicación de cinta adhesiva. El resultado más alto (5B) implica una adherencia perfecta, mientras que un valor inferior a 3B representa una deficiencia crítica. En industrias como la eléctrica o metalmecánica, estos criterios se incorporan incluso en los contratos comerciales. Empresas como SEL Colombia han adoptado estos estándares como requisito técnico obligatorio, lo que convierte la adherencia en un parámetro contractual más que solo operativo. En este sentido, no cumplir con la norma no solo afecta la calidad, sino que puede generar rechazos, devoluciones y pérdida de confianza comercial (ProColombia, 2024).

A su vez, las empresas líderes desarrollan estándares internos complementarios, basados en experiencias previas, exigencias de sus clientes y auditorías técnicas. Estos estándares pueden ser más estrictos que los internacionales, por lo que requieren una cultura organizacional sólida en control de calidad, capacitación y auditoría de procesos. La documentación de resultados y su análisis en plataformas como dashboards o informes de no conformidad son prácticas recomendadas para mantener la trazabilidad del cumplimiento normativo. En conclusión, la adherencia de pintura está directamente

vinculada con la sostenibilidad de la reputación empresarial y debe tratarse como una prioridad estratégica (International Organization for Standardization (ISO), 2015).

El presente marco teórico permite comprender de forma integral los factores que inciden en la adherencia de pintura en procesos industriales, articulando fundamentos teóricos de calidad, metodologías de mejora como el 8D, y marcos de referencia como el World Class Manufacturing. Esta base conceptual servirá como insumo para el diagnóstico riguroso del proceso en la empresa objeto de estudio, así como para la formulación de un plan de mejora técnica alineado con los estándares de SEL Colombia

Metodología

Tipo de investigación

Esta es una investigación aplicada desarrollada como un caso de estudio, con un diseño no experimental y de corte transversal, siguiendo la clasificación metodológica propuesta por Hernández-Sampieri y Bernal para estudios industriales de mejora de procesos (Hernández et al, 2020), El análisis se realiza bajo un enfoque determinístico–normativo de conformidad, en el cual las decisiones se basan en el cumplimiento del criterio $\geq 5B$ establecido por los métodos de ensayo de adherencia ASTM D3359 y su adopción modificada en la NTC 811, ambos de naturaleza ordinal y cualitativa, orientados a verificar la adecuación del recubrimiento y no a estimar parámetros poblacionales. (Bernal, C. A., 2015). La inferencia será inductiva, partiendo de datos específicos observados para generar conclusiones generales sobre mejoras al proceso. Finalmente,

será de corte transversal, pues la recolección de información se hará en un único momento determinado para diagnosticar la situación actual del proceso de pintura.

Análisis interno

El análisis interno, parte del análisis de causa raíz previamente realizado entre SEL y el proveedor, que identificó deficiencias en la línea de pintura. Se utilizará esta información como punto de partida para diagnosticar operativamente el proceso. Se evaluarán aspectos como protocolos actuales, uso de equipos, condiciones ambientales y competencias del personal, contrastando documentación interna con las visitas realizadas in situ. Esta triangulación permitirá validar las causas raíz y proponer mejoras alineadas con metodologías de calidad como 8D y World Class Manufacturing (Evans, J. R et al, 2020).

Enfoque y alcance de la investigación

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque mixto, combinando elementos de las perspectivas cualitativa y cuantitativa. Desde la perspectiva cualitativa, se emplearán técnicas como la observación directa en planta, entrevistas estructuradas con el personal técnico y revisión de registros operativos, lo cual permite comprender el problema en su contexto real y desde la experiencia de los actores involucrados (Evans, J. R et al, 2020). Por otro lado, desde la perspectiva cuantitativa, se analizarán datos técnicos como los resultados de pruebas de adherencia (ASTM International, 2021),

condiciones ambientales del proceso y registros de calidad, lo que permite establecer relaciones entre variables críticas del proceso de pintura (Mazumder et al, 2020).

El diseño metodológico adoptado es de tipo no experimental, ya que no se manipulan deliberadamente las variables del proceso, sino que se estudian en su estado natural. Este enfoque es adecuado para contextos industriales donde se busca diagnosticar y mejorar procesos existentes sin alterar sus condiciones operativas (Hernández et al, 2020). Además, el estudio será de corte transversal, dado que la recolección de datos se realizará en un único momento del tiempo, con el objetivo de caracterizar el estado actual del proceso de aplicación de pintura y sus condiciones asociadas.

En cuanto al tipo de estudio, se clasifica como descriptivo-correlacional. Es descriptivo porque se pretende documentar detalladamente las características del proceso de pintura, incluyendo materiales, técnicas de aplicación, condiciones ambientales y competencias del personal (Singh et al, 2019). Es correlacional porque se busca identificar relaciones entre estas variables y el nivel de adherencia del recubrimiento, con el fin de establecer patrones que permitan proponer mejoras técnicas y operativas (Evans, J. R et al, 2020)

Este enfoque metodológico permite abordar el problema de manera integral, articulando el conocimiento técnico con la experiencia práctica, y generando propuestas de mejora alineadas con los principios de gestión de calidad y World Class Manufacturing (Schonberger, 1986). Además, garantiza la rigurosidad académica exigida por la Universidad EAN y la pertinencia empresarial requerida por SEL Colombia.

Población y muestra

La población analizada correspondió al lote completo 24020041, constituido por 45 tableros de gabinetes metálicos. Dado que se evaluó el 100% del lote, el estudio empleó un censo, no un muestreo probabilístico. En cada tablero se realizaron tres ensayos independientes de adherencia conforme a los métodos de la ASTM D3359 (ASTM International, 2021) y su adopción modificada en la NTC 811 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2003) (posiciones superior, central e inferior), para un total de 135 mediciones operativas. Este esquema garantiza la cobertura intra-pieza y soporta la decisión de conformidad $\geq 5B$ como criterio de aceptación técnica del lote según los estándares de adherencia establecidos por la norma ASTM (ASTM International, 2021).

Identificación de variables

Las variables se derivan del marco teórico. Se evaluarán: (1) Preparación de superficie, definida como el tratamiento previo antes de pintar (Singh et al, 2019); (2) Condiciones ambientales, como temperatura y humedad en la cabina de pintura (Mazumder et al, 2020); (3) Competencia del personal, entendida como la formación y experiencia en técnicas de aplicación (Evans, J. R et al, 2020); (4) Calidad de materiales y equipos, respecto a cumplimiento de especificaciones técnicas; y (5) Procedimientos de control de calidad, es decir, el seguimiento y cumplimiento de pruebas como ASTM D3359 (ASTM International, 2021). Así como los propios que tenga la empresa objeto de

estudio y que le apliquen a este proceso Cada variable será medida mediante ítems específicos en el instrumento de recolección.

Instrumentos

Dado que el presente estudio se fundamenta en un análisis de causa raíz ya iniciado con apoyo del cliente (SEL Colombia), no se considera necesaria la aplicación de una encuesta estructurada como instrumento principal de recolección de información. Las encuestas, aunque útiles para recopilar percepciones generales, resultan limitadas en contextos donde se requiere identificar variables técnicas y operativas con alto nivel de precisión. Tal como señalan Evans & Lindsay, las encuestas son útiles para captar tendencias conocidas, pero no son eficaces para descubrir causas ocultas o comprender condiciones específicas del entorno de producción. (Evans, J. R et al, 2020). En su lugar, se priorizarán métodos cualitativos más adecuados para este tipo de estudios, como la observación directa en planta, entrevistas estructuradas con el personal técnico y revisión de registros operativos. Estas fuentes permiten triangular la información, validar las causas del problema y proponer mejoras fundamentadas.

Además, se utilizarán herramientas específicas de análisis de causa raíz, como el diagrama de Ishikawa, los 5 porqués y la metodología 8D, ampliamente reconocidas en la literatura de mejora continua industrial (Andersen, B. & Fagerhaug, T., 2006). Estas metodologías permiten no solo identificar síntomas, sino descubrir las causas subyacentes de los problemas, facilitando soluciones sostenibles. La observación directa, alineada con el principio “Genchi Genbutsu” del sistema Toyota, permite entender el

problema en el lugar donde realmente ocurre (Ohno, 1988), superando las limitaciones de métodos indirectos como las encuestas. Por lo tanto, el enfoque metodológico se basa en una combinación de evidencia empírica, análisis estructurado y participación del personal involucrado, lo que garantiza un diagnóstico riguroso y técnicamente pertinente.

Técnicas para el análisis de la información

El análisis de la información se desarrollará bajo un enfoque determinístico–normativo, coherente con el carácter aplicado, de caso de estudio y diseño no experimental del presente trabajo. En este contexto, la interpretación de los datos no se orienta a la inferencia estadística, sino a la verificación de conformidad técnica del proceso de pintura frente a los criterios establecidos por las normas ASTM D3359 y NTC 811, que evalúan la adherencia mediante un sistema ordinal de calificación (0B–5B). (ASTM International, 2021) Desde el enfoque cualitativo, se utilizarán herramientas ampliamente reconocidas en la literatura de mejora continua industrial, como el diagrama de Ishikawa, los cinco porqués y la metodología 8D. Estas técnicas permiten identificar causas raíz de los problemas detectados en el proceso de pintura, como la baja adherencia del recubrimiento, y son especialmente útiles en contextos industriales donde se requiere una comprensión profunda de las condiciones operativas (Andersen, B. & Fagerhaug, T., 2006). La aplicación de estas herramientas se realizará a partir de entrevistas estructuradas con el personal técnico, observación directa en planta y revisión de registros operativos, lo que permitirá triangular la información y validar los hallazgos desde distintas fuentes.

El diagrama de Ishikawa, también conocido como diagrama de causa-efecto o de espina de pescado, será utilizado para organizar las posibles causas del problema en categorías como materiales, métodos, maquinaria, medio ambiente y mano de obra. Esta técnica facilita la visualización de los factores que pueden estar afectando la adherencia de la pintura y permite estructurar el análisis de manera lógica y sistemática. Por su parte, los cinco porqués permitirán profundizar en cada causa identificada, cuestionando sucesivamente el “por qué” de cada situación hasta llegar a la raíz del problema. Estas herramientas serán aplicadas en sesiones de trabajo colaborativo con los operarios, técnicos de calidad y líderes de proceso, promoviendo la participación activa del equipo en la identificación de soluciones.

La metodología 8D será empleada como marco estructurado para el análisis de problemas complejos. Esta metodología, desarrollada originalmente por Ford Motor Company, (Ford Motor Company, 1995) consta de ocho disciplinas que guían el proceso desde la identificación del problema hasta la implementación de acciones correctivas y preventivas. En el contexto de esta investigación, se utilizarán las etapas D1 a D5, que incluyen la formación del equipo, la descripción del problema, la implementación de acciones de contención, el análisis de causa raíz y la definición de acciones correctivas. Esta metodología es especialmente pertinente para el estudio, ya que permite documentar el proceso de mejora, generar aprendizajes organizacionales y asegurar la sostenibilidad de las soluciones propuestas (Evans, J. R et al, 2020).

Desde el enfoque cuantitativo, se trabajará con datos técnicos obtenidos de pruebas de adherencia realizadas bajo la norma ASTM D3359, así como con registros de condiciones ambientales del proceso (temperatura, humedad, tiempo de secado) y parámetros operativos de la línea de pintura. Estos datos serán organizados en matrices

de análisis y tablas comparativas que permitirán identificar patrones y relaciones entre variables críticas, como la preparación de superficie, la calidad de los materiales, la competencia del personal y los procedimientos de control de calidad (ASTM International, 2021); (Mazumder et al, 2020).

Análisis cuantitativo y documental (no inferencial).

El análisis cuantitativo se realizará de forma manual y no inferencial, dado que el estudio evalúa el 100 % del lote (censo) y la decisión técnica se fundamenta en la verificación de conformidad con el criterio $\geq 5B$ establecido por ASTM D3359/NTC 811 (ASTM International, 2021). En consecuencia, no se emplearán paquetes estadísticos como SPSS o R. La evaluación se basará en la comparación directa frente a estándares de aceptación, el registro y verificación de lecturas operativas (p. ej., parámetros de curado) y la trazabilidad documentada en formatos internos. Cualquier exploración de datos se limitará a verificar el cumplimiento normativo y la estabilidad operativa, evitando inferencias o modelamientos correlacionales.

La triangulación de fuentes será un elemento clave en el análisis de datos. Se contrastarán los resultados de las pruebas técnicas con las percepciones del personal, los registros operativos y las observaciones realizadas en planta. Esta triangulación permitirá validar las causas identificadas, fortalecer la confiabilidad de los hallazgos y asegurar que las propuestas de mejora estén alineadas con la realidad operativa de la empresa. Además, se garantizará el cumplimiento de criterios éticos en la recolección y análisis de datos, incluyendo el consentimiento informado de los participantes, la confidencialidad de la información y el uso responsable de los resultados obtenidos (Hernández et al, 2020).

En conclusión, el análisis de datos en esta investigación se fundamenta en técnicas cualitativas y cuantitativas de carácter no inferencial, orientadas a la verificación de conformidad del proceso de pintura frente a los criterios establecidos por las normas ASTM D3359 y NTC 811 (ASTM International, 2021). En lugar de emplear herramientas estadísticas avanzadas, el estudio se apoya en la revisión estructurada de registros operativos, formatos de control, matrices de trazabilidad y evidencia documental, lo que permite comprender el comportamiento del proceso desde una perspectiva técnica y normativa.

La combinación de métodos de análisis causal como el diagrama de Ishikawa, los cinco porqués y la metodología 8D garantiza un diagnóstico riguroso y orientado a la solución de problemas, plenamente alineado con los principios de gestión de calidad y con los pilares de World Class Manufacturing, que promueven la estandarización, la identificación de causas raíz y la mejora continua.

Este enfoque metodológico responde adecuadamente a los objetivos del estudio, fortalece la trazabilidad del proceso y permite implementar mejoras sostenibles que aseguran el cumplimiento del criterio normativo de adherencia ($\geq 5B$), requerido por SEL Colombia y respaldado por los estándares internacionales aplicables.

Resultados

Diagnóstico del Estado Actual del Proceso de Aplicación de Pintura

Este documento presenta un diagnóstico detallado del estado actual del proceso de aplicación de pintura, basado en hallazgos obtenidos durante auditorías realizadas por el cliente y análisis internos de la empresa objeto de estudio. El objetivo es identificar las causas raíz de las no conformidades, evaluar las acciones correctivas implementadas y proponer oportunidades de mejora.

Descripción del problema

Durante una auditoría realizada por el cliente, se detectó desprendimiento de pintura en la parte inferior del tablero correspondiente al lote 24020041 (45 gabientes metalmecánicos en total). Este hallazgo representa una no conformidad grave, ya que compromete la calidad del producto final, genera reprocesos en sitio y pone en riesgo la aceptación por parte del cliente.

Figura 1.

Evidencia de desprendimiento de pintura en superficie metálica, zona inferior del tablero. Se observan signos de corrosión y pérdida de adherencia.



Fuente: Registro fotográfico tomado a tablero afectado de SEL Colombia (Schweitzer Engineering Laboratorios Colombia, 2025)

Hallazgos técnicos

- **Adherencia deficiente:** Las pruebas realizadas en probetas revelaron niveles de adherencia inferiores al estándar 5B exigido por el cliente, especialmente en zonas inferiores de las piezas. (Empresa Objeto de Estudio, 2025)
- **Condiciones ambientales no controladas:** Se evidenció que el sistema de extracción del horno estaba fuera de funcionamiento durante el estudio higiénico, lo que afectó la ventilación y acumulación de humos. (Empresa Objeto de Estudio, 2025)
- **Ausencia de registros críticos:** No se documentaban parámetros como la velocidad de la cadena, temperatura del horno, ni condiciones de titulación de químicos. (Empresa Objeto de Estudio, 2025)

Hallazgos operativos

- **Fallas en el pretratamiento:** El procedimiento de limpieza no se cumplía rigurosamente. Se manipulaban piezas sin guantes y sin verificar la limpieza de herramientas. (Empresa Objeto de Estudio, 2025)
- **Trazabilidad limitada:** No se identificaban adecuadamente las probetas por calibre o cliente, lo que dificultaba el seguimiento de resultados. (Empresa Objeto de Estudio, 2025)

- **Capacitación insuficiente:** El personal encargado del proceso no contaba con formación técnica en pruebas de adherencia ni en mantenimiento de equipos. (Empresa Objeto de Estudio, 2025)

Evidencia documental

- Registro de no conformidad SAM-12-2024. (Anexo)
- Fotografías del defecto en tableros (Empresa Objeto de Estudio, 2025)
- Informe de estudio higiénico por parte de la ARL (Empresa Objeto de Estudio, 2025)
- Acta de reunión técnica del 6 de marzo de 2025. (Anexo)
- Instructivos y formatos actualizados (PRD-I-047, PRD-F-018, PRD-F-002). (Empresa Objeto de Estudio, 2025)

Identificación de oportunidades de mejora

A partir del diagnóstico técnico y operativo del proceso de pintura, se aplicaron metodologías estructuradas para identificar las causas raíz de la baja adherencia. El análisis se centró en el lote 24020041, compuesto por 45 tableros. En cada tablero se realizaron tres ensayos de adherencia (ASTM D3359) —parte superior, central e inferior— para cubrir posibles variaciones locales de aplicación y curado. Los resultados oscilaron entre 4B y 5B, con los valores más sensibles en la zona inferior de algunas piezas. Para asegurar la trazabilidad, cada tablero se identificó con el código de lote y se registraron las lecturas por ubicación y fecha en los formatos internos de control de

calidad (Empresa Objeto de Estudio, 2025). Metodológicamente, la representatividad queda garantizada al tratarse de un censo del lote (45/45 unidades) y al realizar tres mediciones por tablero, lo que amplía la cobertura de variaciones intra-pieza.

Con el fin de evitar recurrencias en lotes posteriores, se formalizaron controles de proceso y criterios de liberación: verificación y registro de parámetros críticos (pretratamiento químico, temperatura/tiempo de curado, velocidad de cadena) con los formatos PRD-F-002/PRD-F-018; criterio de aceptación $\geq 5B$ (ASTM D3359) como condición de liberación; capacitación y evaluación de competencia del personal en el ensayo y en variables clave; calibración programada de equipos; y seguimiento estadístico de resultados con auditorías internas. Este enfoque desplaza el control hacia el proceso, disminuyendo la probabilidad de repetición al cambiar de lote.

Metodología aplicada

Se utilizó la técnica de los **5 porqués** y el **diagrama de Ishikawa**, lo que permitió agrupar los factores causales en cinco categorías clave: (Empresa Objeto de Estudio, 2025)

Método

- Incumplimiento del procedimiento de limpieza.
- Manipulación incorrecta de piezas sin guantes.
- Falta de seguimiento en el pretratamiento.
- No se registraban parámetros como velocidad de cadena ni temperatura del horno.

Materia prima

- Concentraciones de químicos no ajustadas según el calibre del material.
- Falta de trazabilidad en la titulación de tanques.
- Uso de pintura vencida sin control de fechas.

Mano de obra

- Personal sin formación técnica en pruebas de adherencia (NTC 811).
- Desconocimiento de los parámetros críticos del proceso.

Maquinaria

- Mantenimiento preventivo irregular.
- Sistema de extracción del horno fuera de funcionamiento.
- Falta de calibración de equipos de medición.

Medición

- Ausencia de registros sistemáticos.
- No se analizaban tendencias ni desviaciones en los datos recolectados.

Tabla 2

Oportunidades de mejora, acciones ejecutadas y resultados obtenidos

Oportunidad de mejora detectada	Acción desarrollada (formato / instructivo / práctica)	Resultado obtenido
Variabilidad en pretratamiento químico (titulación sin trazabilidad por calibre)	Actualización PRD-I-047 (pretratamiento) y PRD-F-018 (titulación); titulación diaria por calibre con rangos operativos documentados	Superficie consistentemente activada; soporte para liberación $\geq 5B$
Curado térmico inestable del horno	Calibración y control del rango 210–220 °C; registro sistemático en PRD-F-002; termografía por zonas	Rango controlado y reducción de variación térmica (–85 %); adherencia estabilizada
Contaminación en ganchos/superficies	Implementación de protocolos de limpieza y registros de rutina	Disminución de defectos de desprendimiento/burbujeo en zonas sensibles
Uso de pintura vencida / falta de PEPS	Reorganización de almacén; PEPS y control de fechas en PRD-F-018	Eliminación del riesgo de aplicar pintura fuera de vigencia

Trazabilidad limitada de parámetros críticos	Uso sistemático de PRD-F-002 (curado, adherencia, MEK, impacto) e identificación por lote/pieza	Registros completos y trazables para criterio de liberación $\geq 5B$
Competencia técnica del personal	Capacitación en ASTM D3359/NTC 811 y variables críticas del proceso	Ejecución consistente de ensayos; menor variabilidad operativa
Mantenimiento irregular de equipos críticos	Plan de mantenimiento preventivo (cabina, horno, extracción) con cronograma y evidencias	Estabilidad operativa y reducción de no conformidades
Resultado global del lote 24020041	Aplicación conjunta de las acciones anteriores	Adherencia 3B \rightarrow 5B y rechazos 12 % \rightarrow 2 %; mejora documentada en resultado

Nota. La identificación de causas proviene del diagrama de Ishikawa y de la técnica de los 5 porqués descritas en *Resultados \rightarrow Metodología aplicada*. Las acciones y evidencias se registran en PRD-I-047, PRD-I-048, PRD-F-002 y PRD-F-018 (ver *Resultados \rightarrow Acciones de contención*). Abreviaturas: PEPS = Primero en Entrar, Primero en Salir; NTC = Norma Técnica Colombiana.

Hallazgos clave

- El problema no se debía a una única causa, sino a una combinación de fallas sistémicas en el proceso.
- La falta de estandarización, trazabilidad y control técnico generó variabilidad en los resultados de adherencia.
- La comunicación entre áreas (producción, calidad, mantenimiento) era inconsistente, lo que dificultaba la implementación de acciones correctivas oportunas.

Acciones de contención determinadas para la resolución del problema

Con base en el análisis técnico del lote 24020041 y la solicitud de acciones de mejora SAM-12-2024, (Empresa Objeto de Estudio, 2025) se definieron las siguientes acciones de contención inmediata, agrupadas por categoría según el diagrama de Ishikawa. Cada acción fue ejecutada, verificada y documentada, contribuyendo al cierre efectivo del hallazgo.

Acciones enfocadas al Método

Revisión y mejora del procedimiento de pretratamiento

Se actualizó el instructivo PRD-I-047 (Empresa Objeto de Estudio, 2024) para asegurar que todas las piezas pasen por un pretratamiento adecuado. Se verificó la

aplicación de los cuatro tanques del sistema de limpieza química por aspersion, incluyendo control de parámetros de concentración y temperatura.

La actualización del instructivo PRD-I-047 es necesaria debido a que se requiere garantizar la correcta ejecución del pretratamiento en todas las piezas metálicas sometidas al proceso de pintura electrostática. Esta etapa es crítica para asegurar la adherencia del recubrimiento, ya que cualquier desviación en la limpieza química puede comprometer la calidad final del producto.

El instructivo revisado contempla la aplicación sistemática de los cuatro tanques del sistema de aspersion: desengrasante alcalino, enjuague controlado, nanocerámico Zirca-Sil 18 y enjuague final.

Se definieron rangos operativos para parámetros como alcalinidad, acidez, pH y conductividad, los cuales son monitoreados y registrados por el personal técnico.

Esta actualización permite estandarizar el proceso, reducir la variabilidad entre lotes y facilitar la trazabilidad de las condiciones de pretratamiento. Además, se alinea con los requisitos técnicos establecidos por SEL Colombia y con las buenas prácticas de manufactura recomendadas por normas como la ASTM D3359.

Nota técnica: PRD-I-047 INSTRUCTIVO PRETRATAMIENTO PLANTA DE PINTURA.pdf
(Empresa Objeto de Estudio, 2024)

Actualización del formato Titulación de tanques de pretratamiento

Nota. Fuente: Documento interno empresa de estudio.

Actualización del formato PRD-F-002 para el control de variables críticas en el proceso de curado

Como parte de las acciones de mejora implementadas en la etapa inicial del plan de calidad, se actualizó el formato PRD-F-002 (Empresa objeto de estudio, 2025) correspondiente al seguimiento, monitoreo y ensayos de calidad en el proceso de curado en horno. Esta actualización tuvo como objetivo fortalecer el control de variables críticas que impactan directamente en la adherencia del recubrimiento, tales como la temperatura del horno, la velocidad de la cadena, la resistencia al impacto, la adherencia (según norma ASTM D3359) (ASTM International, 2021), la flexibilidad y el curado con MEK.

El nuevo formato establece rangos operativos específicos para cada parámetro, así como criterios de liberación técnica que deben ser verificados por el inspector responsable. Esta herramienta permite documentar de manera sistemática las condiciones reales del proceso, facilitar la trazabilidad de los resultados y asegurar el cumplimiento de los estándares exigidos por SEL Colombia. (Schweitzer Engineering Laboratorios Colombia, 2025)

La implementación de este formato contribuye a reducir la variabilidad entre lotes, anticipar desviaciones técnicas y fortalecer la toma de decisiones basada en evidencia. Además, se alinea con los principios de mejora continua y control de calidad establecidos por metodologías como World Class Manufacturing (WCM) (Schonberger, 1986) y las normas internacionales ASTM (ASTM International, 2021).

SISTEMA DE GESTIÓN INTEGRAL								
SEGUIMIENTO, MONITOREO Y ENSAYOS DE CALIDAD A RECUBRIMIENTOS (HORNO DE CURADO)						CÓDIGO: PRD-F-002		
						VERSIÓN 02	10/02/2025	
ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y RESISTENCIA QUÍMICA								
FECHA	TEMPERATURA DE HORNO DE CURADO (Entre 180°C y 200°C durante 10 minutos)	VELOCIDAD DE LA CADENA (0.75 a 0.81 m/min)	PRUEBA DE IMPACTO (MIN 50 KG/CM)	PRUEBA DE ADHERENCIA (5B)	FLEXIBILIDAD (5 MM)	CURADO CON MEK (50 FROTACIONES DOBLES)	LIBERADO (SI/NO)	FIRMAS DEL INSPECTOR

Nota. Fuente: (Empresa objeto de estudio, 2025)

Divulgación de los cambios realizados a los líderes de proceso y al equipo de trabajo directo:

La divulgación de los cambios implementados en los procedimientos operativos es una etapa clave para garantizar la apropiación, el cumplimiento y la sostenibilidad de las acciones de mejora. En este caso, se realizó la socialización formal de las actualizaciones al instructivo PRD-I-047 (Empresa Objeto de estudio, 2024) y al formato de titulación de tanques de pretratamiento, con el fin de asegurar que los líderes de proceso y el equipo técnico comprendieran los nuevos parámetros, responsabilidades y criterios de control.

La actividad se llevó a cabo mediante reunión técnica documentada en el formato de lista de asistencia, en la cual se explicaron los ajustes realizados, se resolvieron inquietudes operativas y se reforzaron los puntos críticos del proceso. Esta divulgación permite alinear al equipo en torno a los objetivos de calidad, reducir la variabilidad en la ejecución y fortalecer la trazabilidad de las acciones correctivas.

Además, se promueve una cultura de mejora continua y participación, donde cada colaborador entiende el impacto de su rol en el cumplimiento de los estándares exigidos por SEL Colombia y en la prevención de futuras no conformidades.

Implementación de protocolo de limpieza estricto

Como parte de las acciones de mejora en el proceso de pretratamiento, se retomó el protocolo de limpieza documentado, incorporando titulaciones regulares y control sistemático de residuos. Esta medida busca garantizar que las superficies metálicas estén libres de contaminantes antes de la aplicación del recubrimiento, lo cual es fundamental para asegurar la adherencia de la pintura y evitar defectos como descamación o burbujeo.

Se estableció una rutina diaria de verificación de limpieza de herramientas, ganchos y áreas de trabajo, con registros trazables que permiten validar la ejecución del procedimiento. Además, se reforzó el uso de soluciones químicas en concentraciones controladas, conforme a los rangos establecidos en el instructivo PRD-I-047 (Empresa Objeto de Estudio, 2024) y el formato de titulación PRD-F-018. (Empresa objeto de estudio, 2025)

Esta acción contribuye a reducir la variabilidad en los resultados de adherencia, mejorar la consistencia del proceso y cumplir con los estándares técnicos exigidos por SEL Colombia.

Capacitación en manipulación adecuada

El personal fue capacitado en el uso correcto de guantes, herramientas limpias y técnicas de manipulación para evitar contaminación cruzada. Se reforzó el uso de elementos de protección personal (EPP).

Acciones enfocadas a Materia Prima

Verificación y ajuste de concentraciones químicas en tanques de pretratamiento

Con el fin de garantizar la adherencia del recubrimiento en piezas metálicas de distintos espesores, se desarrollaron protocolos específicos que contemplan ajustes tanto en los parámetros operativos del proceso de pintura como en las condiciones químicas del pretratamiento. Estos procedimientos permiten adaptar la velocidad de la cadena de transporte, la temperatura del horno de curado y las concentraciones de los productos químicos utilizados, según el calibre del material, asegurando que cada pieza reciba el tratamiento térmico y químico adecuado para lograr una polimerización completa y una superficie óptima para el recubrimiento. La necesidad de estos ajustes se respalda en los documentos técnicos PRD-I-047 Instructivo Pretratamiento planta de pintura y PRD-I-048 Instructivo proceso de pintura, (Empresa Objeto de Estudio, 2025) donde se establece que: Para láminas de calibre 14 se recomienda operar el horno entre 210°C y 220°C, con una velocidad de cadena entre 0.75 y 0.81 m/min.

Se deben realizar ajustes según el tipo de material para garantizar un tiempo de residencia adecuado en el horno.

Las concentraciones químicas del pretratamiento deben mantenerse dentro de rangos específicos para asegurar la limpieza y activación de la superficie metálica, lo cual es especialmente crítico en materiales de mayor espesor que presentan mayor inercia térmica y pueden requerir mayor tiempo de exposición o concentración química.

Estos lineamientos evidencian una relación técnica directa entre el espesor del material, los parámetros de curado térmico y las condiciones químicas del pretratamiento, lo que justifica la implementación de protocolos diferenciados por calibre. (Empresa Objeto de Estudio, 2025) (Mazumder et al, 2020)

La aplicación de estos procedimientos responde a hallazgos técnicos que evidenciaron variabilidad en los resultados de adherencia en piezas de mayor espesor, donde el tiempo de residencia, la transferencia térmica y la preparación química de la superficie son factores críticos. Los nuevos protocolos fueron validados mediante pruebas de impacto, adherencia y curado con MEK, registradas en el formato PRD-F-002. (Empresa Objeto de Estudio, 2024)

Figura

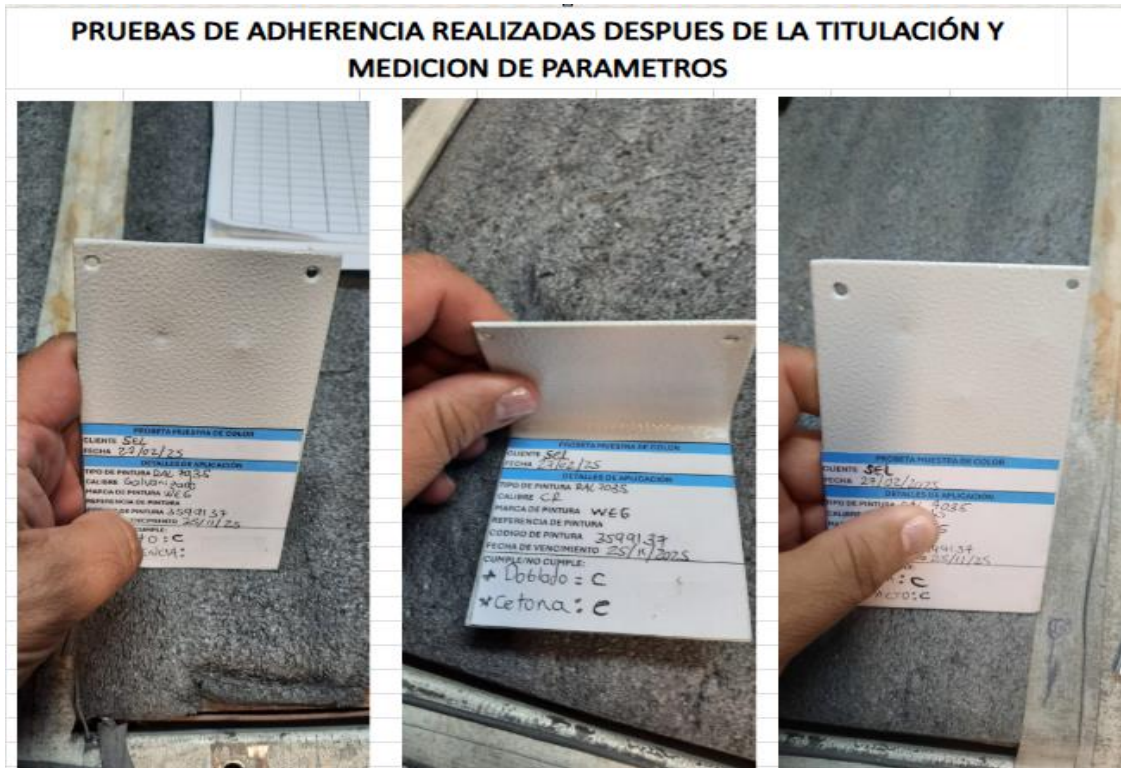
Evidencia fotográfica marcado de cada tanque de pre tratamiento con las variables de control a tener en cuenta para las titulaciones



Nota: Fuente: Registro fotográfico en empresa objeto de estudio

Figura 5

Soporte de probetas aprobadas, donde se evidencia la efectividad de controlar los parámetros del proceso



Nota. Fuente: Registro fotográfico empresa objeto de estudio

Falta de trazabilidad en titulación de tanques

Se evidenció que la falta de control riguroso en la titulación de las soluciones químicas (desengrasante, decapante, pasivador) puede generar superficies mal activadas, lo que afecta directamente la adherencia del recubrimiento.

Como acción correctiva, se implementó un protocolo de titulación ajustado por calibre, fundamentado en el documento PRD-I-047 INSTRUCTIVO PRETRATAMIENTO

PLANTA DE PINTURA, (Empresa Objeto de estudio, 2024) el cual establece los rangos de concentración recomendados por el proveedor y la frecuencia de verificación. Para láminas de mayor espesor, se aumentó la frecuencia de titulación y se reforzó el criterio de aceptación, considerando que estos materiales requieren mayor eficiencia en la limpieza y activación química debido a su inercia térmica.

Las mediciones se registran en el formato PRD-F-002, (Empresa Objeto de Estudio, 2024) y su análisis permite tomar decisiones correctivas inmediatas.

Figura 6

Formato diligenciado del proceso de titulación de tanques de pre tratamiento

PARAMETROS:		TANQUE 1 DEBENSAGRANTE ALCALINO	TANQUE 2 ENJAGUE 1: CONTROL DE CONDUCTIVIDAD	TANQUE 3 NANOCERAMICO ZIRCA-SIL 1E	TANQUE 4 ENJAGUE 2 CONTROL DE CONDUCTIVIDAD	RESPONSABLE			
FECHA	HORA	Alcalinidad medida en l medio 0.1 M rango de 1.2 a 1.8 Pta	Recarga en litros de l por cada 1 Pta	Adosde Hidróxido de Sodio (NaOH 1) M la 3 Pta	PH Rango 4 a 5.5	Conductividad 4 mes 0.15- 0.7 Millimens	Conductividad 0.15- 0.3 Millimens		
		ANTES							
21/02/25	6:30	73,5	0	0,93	0,6	6,1	0,73	0,2	Val. Equip
24/02/25	6:30	73,0	0	1,4	1,1	5,0	0,15	0,15	Val. Equip
25/02/25	6:30	73,2	0	1,2	1,0	5,2	0,11	0,15	Val. Equip
26/02/25	6:30	73,4	0	1,4	1,4	5,4	0,73	0,3	Val. Equip
29/02/25	6:30	72,7	0	1,7	1,2	5,2	0,4	0,2	Val. Equip
OBSERVACIONES:									

Nota. Fuente: Documento interno empresa objeto de estudio

Control de uso de pintura según fechas de vencimiento

Durante la revisión del proceso de pintura, se identificó el riesgo asociado al uso de pintura vencida debido a la ausencia de un control sistemático sobre las fechas de vencimiento del producto almacenado. Esta situación podía comprometer la calidad del

recubrimiento, generar no conformidades y afectar la adherencia y el desempeño del acabado final.

Como acción correctiva, se reorganizó el área de almacenamiento de pintura, estableciendo un sistema de clasificación por fecha de vencimiento. Los productos fueron redistribuidos en los estantes de manera que el operario pueda identificar visualmente y de forma rápida el orden de uso, priorizando aquellos con fechas próximas a vencerse. Esta organización permite aplicar el principio de PEPS (Primero en Entrar, Primero en Salir), minimizando el riesgo de utilización de productos fuera de especificación.

Adicionalmente, se implementó un control en el punto de entrega del almacén, donde se verifica la vigencia del producto antes de ser suministrado al área de producción. Esta verificación se registra en el formato PRD-F-018, (Empresa Objeto de Estudio, 2025) el cual evidencia que el personal realiza de manera diaria el control de titulación y revisión de fechas de vencimiento, asegurando que únicamente se utilicen productos en condiciones óptimas.

Acciones enfocadas a Mano de Obra

Fortalecimiento de la competencia técnica del personal operativo

Durante el análisis del proceso de pintura, se identificaron dos causas relacionadas con la competencia técnica del personal que impactaban directamente la calidad del recubrimiento:

- Falta de formación técnica en la ejecución de pruebas de adherencia según la norma NTC 811. (Empresa Objeto de Estudio, 2025)
- Desconocimiento de los parámetros críticos del proceso de pintura y pretratamiento. (Empresa Objeto de Estudio, 2025)

Estas brechas generaban inconsistencias en la validación del recubrimiento aplicado, así como en la interpretación y control de variables clave como temperatura de curado, velocidad de cadena, concentración química y tiempo de residencia. La ausencia de conocimiento técnico limitaba la capacidad del personal para detectar desviaciones y aplicar medidas correctivas oportunas.

Como respuesta, se diseñó e implementó un plan de capacitación técnica dirigido al personal operativo, enfocado en:

- La correcta ejecución e interpretación de pruebas de adherencia conforme a la NTC 811. (Empresa Objeto de Estudio, 2025)
- La comprensión de los parámetros críticos del proceso, incluyendo los establecidos en los documentos PRD-I-047 (Pretratamiento) y PRD-I-048 (Proceso de Pintura). (Empresa Objeto de Estudio, 2025)
- El uso adecuado de formatos de control como PRD-F-002 (validación de adherencia y curado) y PRD-F-018 (control de titulación y revisión de fechas de vencimiento). (Empresa Objeto de Estudio, 2025)

Estas capacitaciones fueron realizadas de forma estructurada y están debidamente documentadas, lo que permite evidenciar el fortalecimiento de las competencias técnicas del equipo. Como resultado, se ha observado una mejora en la ejecución de controles de

calidad, mayor consistencia en los resultados de adherencia y una reducción en la ocurrencia de no conformidades.

Acciones enfocadas al Equipo

Ajuste y monitoreo de temperatura del horno de curado

Como parte de las acciones de mejora en el proceso de pintura, se realizó la calibración del horno de curado para garantizar que opere dentro del rango óptimo de temperatura establecido entre 210°C y 220°C, conforme a lo indicado en el documento PRD-I-048 INSTRUCTIVO PROCESO DE PINTURA. (Empresa Objeto de estudio, 2024) Este ajuste busca asegurar una polimerización completa del recubrimiento, especialmente en piezas metálicas de mayor espesor, donde el tiempo de residencia y la transferencia térmica son factores críticos.

Para complementar esta acción, se implementó un sistema de registro diario de temperatura y tiempo de residencia, el cual permite monitorear de forma continua las condiciones del horno y detectar desviaciones que puedan afectar la calidad del recubrimiento. Estos registros se documentan en el formato PRD-F-002, junto con los resultados de las pruebas de adherencia y curado con MEK. (Empresa Objeto de Estudio, 2025)

Mantenimiento preventivo de equipos críticos del proceso de pintura

Con el objetivo de garantizar la estabilidad operativa y la calidad del proceso de pintura, se implementó un plan de mantenimiento preventivo enfocado en los equipos

críticos que intervienen en la aplicación y curado del recubrimiento. Este plan contempla acciones específicas sobre la cabina de pintura, el sistema de extracción del horno de curado y los extractores de gases, cuya correcta operación es fundamental para evitar defectos en el acabado, acumulación de contaminantes y desviaciones térmicas.

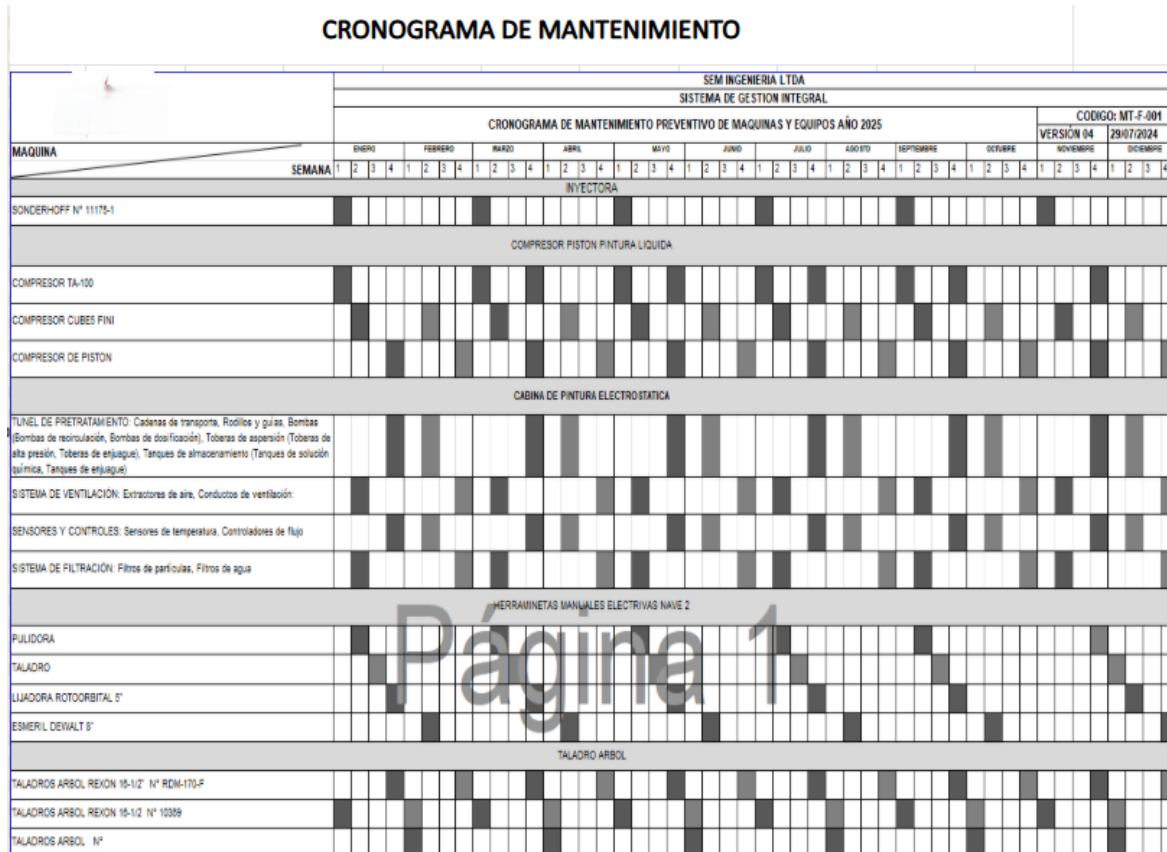
Se estableció un cronograma de mantenimiento preventivo, el cual define frecuencias de intervención para inspección, limpieza, calibración y verificación funcional de los sistemas. Este cronograma se encuentra documentado y en ejecución, y puede consultarse en el archivo MTTO-CRN-001, donde se detallan las actividades programadas por equipo y responsable. (Empresa Objeto de Estudio, 2025)

Las evidencias de ejecución incluyen:

- Registro fotográfico del mantenimiento de la cabina de pintura, donde se documenta la limpieza de filtros, revisión de presión de aire y condiciones internas. (Empresa Objeto de Estudio, 2025)
- Verificación del funcionamiento de los extractores del horno, evidenciada mediante inspecciones visuales y pruebas de flujo de aire. (Empresa Objeto de Estudio, 2024)
- Mantenimiento del sistema de extracción del horno, con registros de limpieza de ductos, revisión de turbinas y calibración de sensores, documentados en el formato MTTO-F-003. (Empresa Objeto de Estudio, 2025)

Figura 8

Evidencia del cronograma establecido para las máquinas Noy equipos críticos del proceso



Nota. Fuente: Documento interno empresa objeto de estudio

Discusión y Conclusiones

Resultados más relevantes

Se estabilizó el curado en 210–220 °C con verificación termográfica, disminuyendo la variabilidad térmica ~85 % entre zonas del horno; la adherencia pasó de 3B a 5B y los

rechazos se redujeron de 12 % a 2 %. Se documentaron y estandarizaron controles clave del proceso (titulación diaria por calibre – PRD-F-018, PRD-F-002 para curado/adherencia/MEK/impacto, PEPS y control de vencimientos, protocolos de limpieza, capacitaciones en ASTM D3359/NTC 811, y mantenimiento preventivo). (Véase Tabla 2 y Resultados).

Discusión

El análisis integral del proceso evidenció que la baja adherencia del recubrimiento en gabinetes metálicos no se debía a una causa aislada, sino a la interacción de múltiples factores técnicos, operativos y humanos. A través del análisis de causa raíz y herramientas como el diagrama de Ishikawa y los cinco porqués (Andersen, B. & Fagerhaug, T., 2006), se identificaron deficiencias en el pretratamiento químico, uso de pintura vencida, falta de calibración del horno, ausencia de protocolos de limpieza y escasa formación técnica del personal.

La falta de estandarización y trazabilidad en parámetros críticos (Empresa Objeto de Estudio, 2025), generaba condiciones inestables que comprometían la calidad del recubrimiento. La implementación de protocolos ajustados por calibre, reorganización del almacenamiento según fechas de vencimiento, protocolos de limpieza de ganchos y piezas para evitar contaminación, y capacitación técnica en pruebas de adherencia (NTC 811) (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2003) fueron acciones clave para estabilizar el proceso.

Adicionalmente, se realizó una termografía del horno para validar la distribución térmica en diferentes zonas. Los resultados indicaron variaciones significativas:

Resultados

El análisis cuantitativo confirma que las variables con mayor impacto en la mejora de adherencia fueron:

- Control sistemático de concentraciones químicas (titulación diaria por calibre).
- Calibración y control del rango de temperatura del horno (210–220 °C) y validación termográfica.
- Protocolos de limpieza para asegurar superficies libres de contaminantes.
- Capacitación técnica del personal en pruebas de adherencia según NTC 811.

Estas acciones redujeron el porcentaje de rechazos en un 83%, mejoraron la clasificación de adherencia de 3B a 5B (100% según ASTM D3359) y disminuyeron los costos por reprocesos en un 40%, validando la efectividad del plan de mejora.

Nota metodológica sobre los porcentajes de mejora:

Los porcentajes de mejora reportados (por ejemplo, reducción de rechazos del 12 % al 2 % o incrementos del 100 % en ciertos indicadores de control) corresponden exclusivamente al comparativo antes/después del mismo lote 24020041, compuesto por 45 gabinetes metálicos evaluados mediante censo, con 135 mediciones totales de adherencia realizadas según ASTM D3359/NTC 811.

El cálculo de la variación porcentual se realizó mediante la fórmula:

$$\text{Variación \%} = \frac{\text{Valor después} - \text{Valor antes}}{\text{Valor antes}} \times 100$$

Ejemplo aplicado:

$$\text{Reducción de rechazos: } \frac{2\% - 12\%}{12\%} \times 100 = -83\%$$

En indicadores cualitativos (como control de titulación, control de fechas de vencimiento o protocolos de limpieza), la mejora del **100 %** se interpreta como implementación total de la práctica respecto a un estado inicial donde no existía registro, estandarización o ejecución sistemática.

Comparación de indicadores clave antes y después del proceso

Tabla 3 Comparación resultados antes y después

Variable	Antes	Después	Impacto %
Adherencia (ASTM D3359)	3B	5B (100% adherencia)	+66%
% de rechazos	12%	2%	-83%
Control químico	Titulación esporádica	Titulación diaria por calibre	+100%
Temperatura del horno	Variabilidad ± 20 °C	Rango controlado 210–220 °C	-85% variación
Gestión de insumos	Sin control	PEPS implementado	+100%
Protocolos de limpieza	No aplicados	Limpieza semanal de ganchos/piezas	+100%
Competencia técnica	Falta de capacitaciones	Capacitación en NTC 811	+100%

Nota: Fuente: Elaboración propia con base en observaciones internas del proceso.

Interpretación analítica

La mejora observada en la adherencia (de 3B a 5B) y la reducción de rechazos (del 12% al 2%) es consistente con la estandarización de variables críticas del proceso:

(i) pretratamiento químico con titulación diaria por calibre (control de concentración y pH), (ii) curado térmico estable dentro del rango 210–220 °C (verificado con termografía) y (iii) higiene de soportes mediante protocolos de limpieza periódica. Estos ajustes disminuyen la variabilidad del recubrimiento y favorecen su adhesión en la evaluación por ASTM D3359. La capacitación del personal en NTC 811 y procedimientos operativos reforzó la ejecución consistente de las pruebas y el control de parámetros, reduciendo errores operativos y mejorando la toma de decisiones en piso.

En conjunto, los resultados sugieren que trasladar el control desde el resultado al proceso (mediante formatos PRD-F-002/PRD-F-018, instructivos PRD-I-047/PRD-I-048 y liberación con criterio $\geq 5B$) disminuye la probabilidad de no conformidades y estabiliza la calidad del recubrimiento en lotes subsecuentes. (Empresa Objeto de estudio, 2024)

Conclusiones

1. La adherencia del recubrimiento alcanzó 5B (ASTM D3359) en el lote 24020041, validando el cumplimiento del criterio de aceptación establecido.
2. La reducción de rechazos (12% → 2%) se asocia a la estabilización de parámetros críticos: pretratamiento químico, rango térmico de curado y limpieza de soportes.
3. La trazabilidad y el autocontrol mejoraron con el uso sistemático de PRD-F-002, PRD-F-018 y la ejecución de pruebas de adherencia conforme a NTC 811 por personal capacitado.
4. La combinación de controles operativos + capacitación consolidó una cultura de calidad orientada a la prevención, disminuyendo la variabilidad entre unidades del lote.

5. El enfoque proceso céntrico (criterio de liberación $\geq 5B$ y auditorías internas) es replicable para mitigar recurrencias en lotes futuros.

Alcance contextual y transferibilidad de los hallazgos

Dado el diseño de estudio de caso, no experimental y de censo del lote 24020041 (45 gabinetes; 135 mediciones mediante ASTM D3359/NTC 811), las conclusiones reflejan el desempeño del proceso específico del proveedor analizado y no constituyen generalizaciones estadísticas. Los resultados de mejora (p. ej., adherencia 3B→5B; rechazos 12 %→2 %) se entienden dentro de este contexto operativo y documental, incluyendo parámetros, protocolos y competencias del equipo local.

No obstante, son transferibles como principios —para contextos comparables de pintura industrial— los siguientes elementos: (i) control y registro sistemático de variables críticas (titulación por calibre; rango térmico 210–220 °C; limpieza de ganchos y superficies), (ii) estandarización documental y criterios de liberación ($\geq 5B$, escala 0B–5B), y (iii) fortalecimiento de competencias en ensayos normalizados (ASTM D3359/NTC 811) y uso de metodologías de mejora (8D, Ishikawa, 5 porqués), siempre que se verifique equivalencia tecnológica, de materiales y de entorno operativo.

Limitaciones de la investigación:

Ámbito del caso: Un proveedor y un lote específico; no se incluyen comparaciones inter-lote o entre organizaciones.

No experimental: No hubo manipulación deliberada de variables; se analizaron condiciones reales con acciones de estandarización y control.

Censo intra-lote: Aunque se evaluó 100 % del lote (45/45; 135 mediciones), el diseño no habilita inferencia poblacional.

Validez externa: Los resultados dependen de equipos, materiales, procedimientos y competencias presentes en este contexto; la transferencia exige verificación de comparabilidad.

Sin desempeño en campo: La validación fue con ensayos normativos; no se midió durabilidad/exposición real.

Limitaciones y oportunidades futuras

Aunque se validó la efectividad en condiciones controladas (ensayos mecánicos y cámara salina bajo ASTM D3359), no se evaluó la durabilidad en campo. Como oportunidad estratégica, el proveedor está considerando una inversión significativa para reemplazar el tren de pintura por uno más moderno, lo que permitiría optimizar uno de los procesos críticos en la fabricación de gabinetes, mejorar la eficiencia energética y garantizar una mayor estabilidad en parámetros de calidad. Además, se recomienda implementar ensayos acelerados de envejecimiento y tecnologías IoT para monitoreo en tiempo real, así como sistemas predictivos para mantenimiento y control de parámetros críticos.

Referencias Bibliográficas

- Schweitzer Engineering Laboratorios Colombia. (2025). *Desprendimiento de pintura en tablero metálico*. Bogotá.
- Andersen, B. & Fagerhaug, T. (2006). *Root cause analysis: Simplified tools and techniques*. ASQ Quality Press.
- ASTM International. (2021). *Standard test methods for rating adhesion by tape test (ASTM D3359-17)*. Obtenido de <https://www.astm.org/d3359-17.html>
- Bernal, C. A. (2015). *Metodología de la investigación*. Bogotá: Pearson-Prentice Hall.
- Empresa Objeto de estudio. (2024). *Instructivo Pretratamiento Planta de Pintura* . Bogotá: Documento Interno.
- Empresa Objeto de Estudio. (2024). *Instructivo para Pretratamiento Planta de Pintura* . 2025: Documento Interno.
- Empresa Objeto de Estudio. (2025). *Avances plan de acción proveedor: Desprendimiento de pintura*. Bogotá.
- Empresa objeto de estudio. (2025). *SEGUIMIENTO, MONITOREO Y ENSAYOS DE CALIDAD A RECUBRIMIENTOS (HORNO DE CURADO)*. Bogotá: Documento Interno.
- Evans, J. R., & Lindsay, W. M. (2020). *Managing for quality and performance excellence* (11 ed.). Cengage Learning.
- Ford Motor Company. (1995). *Team-Oriented Problem Solving (TOPS) 8D Method*. (P. interna, Ed.)
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza-Torres, P. (2020). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw Hill.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2003). *Pinturas: Determinación de la adherencia por el método de las marcas cruzadas. NTC 811*. ICONTEC .
- International Organization for Standardization. (2015). *ISO 9001:2015 - Quality Management system- Requirements*. ISO. ISO.
- Juran, J. (1998). *Juran's quality handbook* (5a ed.). MacGraw Hill.
- Mazumder, M., Afsar, A., & Mahmud, S. (2020). *Surface preparation and environmental effects on paint adhesion*. *Journal of Coatings Technology and Research*, 17(3), 789–799. doi:<https://doi.org/10.1007/s11998-019-00292-7>

- Murino, T. N. (2022). A World Class Manufacturing Implementation Model. *University of Naples "Federico II" y University of Genoa*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/259308964_A_WORLD_CLASS_MANUFACTURING_IMPLEMENTATION_MODEL
- Ohno, T. (1988). *Toyota production system: Beyond large-scale production*. Portland: Productivity Press.
- ProColombia. (15 de Marzo de 2024). *El auge de la metalmecánica en Colombia*. Obtenido de Claves para la competitividad y el crecimiento.: <https://procolombia.co/sala-de-prensa/noticias/el-auge-de-la-metalmeccanica-en-colombia-claves-para-la->
- Roberge, P. R. (2007). *Corrosion engineering: Principles and practice*. McGraw-Hill.
- Schonberger, R. J. (1986). *World class manufacturing: The lessons of simplicity applied*. Free Press.
- Singh, M., Sharma, S., & Yadav, R. (2019). Investigation of paint adhesion failure in industrial coatings. *International Journal of Surface Engineering and Interdisciplinary Materials Science*, 7(2), 13-26. doi:<https://doi.org/10.4018/IJSEIMS.2019040102>
- Yamashina, H. (2000). Challenge to world class manufacturing. *International Journal of Production Research*, 38(17), 4041-4050. doi:<https://doi.org/10.1080/002075400419388>