

Revista **Capital** Intelectual

Ciencia Tecnología Sociedad



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



POTOSÍ
PARA LOS POTOSINOS
GOBIERNO DEL ESTADO 2021-2027



INSTITUTO TECNOLÓGICO
SUPERIOR
DE SAN LUIS POTOSÍ, CAPITAL

Análisis Experimental de la Influencia del Tipo de Molde y la Temperatura de Colada en la Dureza del Aluminio Reciclado

Integración de Metodología PDCA y Arquitectura RAMI 4.0 Para Desarrollo de SCADA: un Caso de Estudio.

Aleaciones de Magnesio Biodegradables Como Alternativas en Implantes Ortopédicos Temporales

Los Hongos Micorrízicos Activan el Alertamiento Vegetal de Coriandrum Sativum a Través de la Comunicación Aérea

Evaluación de un Desoxidante Libre de Cromo a Base de Ácido Nítrico y Bifluoruro de Amonio en Aleaciones de Aluminio Aeronáutico AA2024-T3 y AA7075-T6511

Análisis De Fallas Mediante Herramientas SPC En La Producción Del Empaque 1 En Una Empresa De Cartón

Modelado FEM con Criterio Hill-48 para la Predicción del Retorno Elástico en Doblado en V de Acero Martensítico CRMS1700



Directorio

Dr. Ramon Jiménez López
Director General Tecnológico Nacional de México

MC Manuel Chávez Sáenz
Director de Institutos Tecnológicos Descentralizados

Lic. Deysi Maribel López Sierra
Secretaria de Educación del Gobierno del Estado de San Luis Potosí.

Mtra. Tania Margarita Lomeli Gutierrez
Directora de Educación Media Superior y Superior de la SEGE

Lic. Luis Gerardo Aldaco Ortega
Director General del ITSSLPC

Consejo Editorial

Ing. César Alejandro Rico Martínez
Encargado de la Subdirección Académica del ITSSLPC

Lic. Gerardo Ezequiel Torres Campos
Encargado de la Dirección de Planeación y Vinculación del ITSSLPC

Ing. Alberto Gil de Partearroyo Martínez
Encargado de la Subdirección de Vinculación

Dra. Gabriela Rangel Ramírez.
Encargada de la Subdirección de Posgrado e Investigación del ITSSLPC

Dra. Diana Leticia Espericueta González
Encargada de la Jefatura de División de Ingeniería Industrial del ITSSLPC

Editoras

Dra. Gabriela Rangel Ramírez.
Encargada de la Subdirección de Estudios de Posgrado e Investigación del ITSSLPC

Dra. Diana Leticia Espericueta González
Encargada de la Jefatura de División de Ingeniería Industrial del ITSSLPC

Diseñador

Lic. Gonzalo Israel Guerrero Galaviz

REVISTA CAPITAL INTELECTUAL. Año 12. No. 36; Mayo - Agosto 2026 es una publicación cuatrimestral editada por el Instituto Tecnológico Superior de San Luis Potosí, Capital. Carretera 57 México – Piedras Negras Km 189+100 Tramo Querétaro – San Luis Potosí N° 6501 Villa de Pozos, San Luis Potosí, C.P. 78421 Tel. 444 8041220. <https://slpotosicapital.tecnm.mx/comunicacion-difusion/revista/>; revista.capital.intelectual@gmail.com; Editor responsable: Dra. Gabriela Rangel Ramírez, Encargada de la Subdirección de Posgrado e Investigación. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo No. 042014-073119354200-102, ISSN: 2007-9893; ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Su objetivo principal es difundir el quehacer académico (investigación y docencia) del personal adscrito al ITSSLPC, así como del personal del Tecnológico Nacional de México y otras instituciones de Educación Superior Nacionales y Extranjeras. Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de San Luis Potosí, Capital. Todo artículo publicado es responsabilidad de los autores. Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del Instituto Tecnológico Superior de San Luis Potosí, Capital.

ÍNDICE

Análisis Experimental de la Influencia del Tipo de Molde y la Temperatura de Colada en la Dureza del Aluminio Reciclado	4
Integración de Metodología PDCA y Arquitectura RAMI 4.0 Para Desarrollo de SCADA: un Caso de Estudio.	16
Aleaciones de Magnesio Biodegradables Como Alternativas en Implantes Ortopédicos Temporales	32
Los Hongos Micorrízicos Activan el Alertamiento Vegetal de Coriandrum sativum a Través de la Comunicación Aérea	41
Evaluación de un Desoxidante Libre de Cromo a Base de Ácido Nítrico y Bifluoruro de Amonio en Aleaciones de Aluminio Aeronáutico AA2024-T3 y AA7075-T6511	50
Análisis De Fallas Mediante Herramientas SPC En La Producción Del Empaque 1 En Una Empresa De Cartón	60
Modelado FEM con Criterio Hill-48 para la Predicción del Retorno Elástico en Doblado en V de Acero Martensítico CRMS1700	68

Análisis Experimental de la Influencia del Tipo de Molde y la Temperatura de Colada en la Dureza del Aluminio Reciclado



López Chávez Luz A¹, luz.lc@rioverde.tecnm.mx

Zuñiga Colunga Carlos S¹, carlos.zc@rioverde.tecnm.mx

Briceño Avalos Juana F¹, L23227020@rioverde.tecnm.mx

Ortega García Ivan¹, L23227037@rioverde.tecnm.mx

Mata Noyola David¹, david.mn@rioverde.tecnm.mx

¹**Instituto Tecnológico Superior de Rioverde S.L.P.**

ABSTRACT

Aluminum can recycling represents a key opportunity for sustainability and the circular economy. The transformation of this waste into quality industrial products strictly depends on the control of technical variables during the casting process. This study analyzes the influence of the interaction between mold type and pouring temperature on the hardness of ingots manufactured from recovered aluminum beverage cans, aiming to identify the optimal configuration to maximize this mechanical property. To achieve this, an experimental methodology was implemented using a 3^2 factorial design of experiments with one replicate, completing 18 treatments. The factors studied consisted of three molding materials (green sand, plaster, and steel) and three pouring temperatures (850 °C, 950 °C, and 1050 °C). The procedure integrated raw material conditioning, melting in a crucible furnace, pouring into molds, surface finishing using a CNC milling machine, and subsequent surface hardness measurement on the Hardness Leeb Diamond (HLD) scale. The analysis of variance (ANOVA) results demonstrated that the model is statistically significant ($p = 0.018$) and explains 80.17% of the variability. Both mold type ($p = 0.020$) and pouring temperature ($p = 0.018$) proved to be critical factors with a direct influence on hardness. The steel mold stood out as the most effective, while temperature exhibited a non-linear behavior, peaking at 950 °C and decreasing at 1050 °C. Through model optimization, it was determined that the optimal configuration consists of using a steel mold at a pouring temperature of 950 °C, a combination that predicts a maximum hardness of 194.50 HLD. These findings validate the feasibility of transforming waste containers into resources of high technical and commercial value, significantly increasing the material's hardness and ensuring a metal suitable for components requiring wear resistance. In conclusion, the success of recovered aluminum is directly linked to the rigorous control of its processing parameters, establishing a solid framework for sustainable technological development in regional manufacturing.

RESUMEN

El reciclaje de latas de aluminio representa una oportunidad clave para la sostenibilidad y la economía circular. La transformación de estos residuos en productos industriales de calidad depende estrictamente del control de variables técnicas durante el proceso de fundición. Este estudio analiza la influencia de la interacción entre el tipo de molde y la temperatura de colada sobre la dureza de lingotes fabricados a partir de aluminio recuperado de latas de bebidas, con el objetivo de identificar la configuración óptima

para maximizar dicha propiedad mecánica. Para ello, se implementó una metodología experimental mediante un diseño de experimentos factorial 3^2 con una réplica, completando 18 tratamientos. Los factores estudiados consistieron en tres materiales de moldeo (arena verde, yeso y acero) y tres temperaturas de colada (850 °C, 950 °C y 1050 °C). El procedimiento integró el acondicionamiento de la materia prima, fusión en horno de crisol, vaciado en moldes, acabado superficial mediante fresadora convencional y la posterior medición de la dureza superficial en la escala Hardness Leeb Diamond (HLD). Los resultados del análisis de varianza (ANOVA) demostraron que el modelo es estadísticamente significativo ($p = 0.018$) y explica el 80.17% de la variabilidad. Tanto el tipo de molde ($p = 0.020$) como la temperatura de colada ($p = 0.018$) resultaron ser factores críticos con influencia directa en la dureza. El molde de acero destacó como el más efectivo, mientras que la temperatura exhibió un comportamiento no lineal, alcanzando su punto máximo a los 950 °C y descendiendo a los 1050 °C. Mediante la optimización del modelo, se determinó que la configuración óptima consiste en utilizar un molde de acero a una temperatura de colada de 950 °C, combinación que predice una dureza máxima de 194.50 HLD. Estos hallazgos validan la viabilidad de transformar envases de desecho en recursos de alto valor técnico y comercial, elevando significativamente la dureza del material y garantizando un metal apto para componentes que exijan resistencia al desgaste. En conclusión, el éxito del aluminio recuperado está ligado directamente al control riguroso de sus parámetros de procesamiento, abriendo una pauta sólida para el desarrollo tecnológico sustentable en la manufactura regional.

Introducción

El reciclaje del aluminio constituye una estrategia clave para disminuir el consumo energético y las emisiones asociadas a la producción primaria del metal, ya que la refundición de chatarra requiere aproximadamente el 5% de la energía empleada en la obtención de aluminio a partir de bauxita. Asimismo, el incremento en la disponibilidad de aluminio reciclable plantea nuevos retos para garantizar propiedades mecánicas adecuadas y favorecer una economía circular. (Raabe et al., 2022; International Aluminium Institute, 2024; ARPAL, 2003).

Aunque el aluminio reciclado representa una alternativa sustentable, las propiedades finales del material dependen de las condiciones de fundición.

Variables como la temperatura de colada, el material del molde y la velocidad de solidificación modifican la microestructura del metal y, en consecuencia, sus propiedades mecánicas. (Raabe et al., 2022; Groover, 2010; Kalpakjian & Schmid, 2008).

Diversas investigaciones han empleado diseños experimentales para evaluar el efecto de parámetros de fundición sobre el comportamiento del aluminio. Entre las variables más estudiadas se encuentra la temperatura de colada, las características del molde y la composición de la aleación, debido a su influencia sobre la fluidez, la solidificación y las propiedades mecánicas del material. (Cosíos Espinosa, 2019; Cruz Castro, 2024; Ramírez Sánchez, 2019).

Sin embargo, la mayoría de los estudios disponibles se han desarrollado utilizando aleaciones comerciales o evaluando únicamente una variable del proceso. Existe menor evidencia experimental acerca del efecto combinado del tipo de molde y la temperatura de colada sobre la dureza del aluminio proveniente del reciclaje de latas de bebidas, especialmente mediante diseños experimentales factoriales que permitan cuantificar la interacción entre ambos factores. (Cortés Aparicio, 2024; Cosíos Espinosa, 2019; Ramírez Sánchez, 2019).

Debido a que las variables de proceso pueden actuar de manera independiente o interactuar entre sí, el empleo de un diseño experimental factorial constituye una herramienta estadística adecuada para identificar los factores significativos, cuantificar sus efectos y determinar la combinación de parámetros que optimiza la respuesta del proceso. (Montgomery, 2019; Rodríguez Meza, 2021).

En este contexto, el presente trabajo evalúa la influencia del tipo de molde (arena verde, yeso y acero) y la temperatura de colada (850, 950 y 1050 °C) sobre la dureza de lingotes elaborados con aluminio reciclado proveniente de latas de bebidas, mediante un diseño experimental factorial 3^2 , con el propósito de identificar la combinación de parámetros que maximiza dicha propiedad mecánica.

I.I. OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS.

Analizar la influencia de la interacción entre el tipo de molde y la temperatura de colada en la dureza de lingotes de aluminio recuperado, y su configuración óptima para maximizar dicha propiedad.

Objetivos específicos

Evaluar la influencia de distintos materiales de moldeo: Arena verde, yeso, acero en las propiedades mecánicas,

específicamente la dureza del lingote.

Analizar el efecto de diversas temperaturas de colada: 850, 950, 1050 °C sobre la dureza del aluminio recuperado durante el proceso de fundición.

Fabricar lingotes de aluminio utilizando material proveniente del reciclaje de latas para transformar residuos en recursos de alto valor económico y ambiental.

Determinar la combinación óptima entre el tipo de molde y la temperatura de colada adecuada para maximizar la dureza de los lingotes de aluminio.

II. DESARROLLO DE CONTENIDOS

A. Variable de Respuesta

Dureza del aluminio

Para abordar la dureza como la variable de respuesta principal, es fundamental comprender la composición de la materia prima. Las latas de bebida no están hechas de aluminio puro, sino de una aleación de las series 3000 y 5000. El cuerpo está fabricado con aleación 3004 (o 3104) constituido por un 98.2% de Al, 1% de Mn y 0.8% de Mg. La tapa se elabora con aleación 5182 y el sello con la 5082. (Paucar Pinto, 2023). Y poseen una dureza en base a Brinell entre 60 – 90 HB y para la tapa y la anilla que son de mayor rigidez de hasta 100 HB. (ARPAL, 2003).

B. Factores y Niveles

Para el estudio se emplearon dos factores, el tipo de molde y la temperatura de colada, cada uno con 3 niveles presentados a continuación, es importante mencionar que el tratamiento del molde será precalentado durante todo el proceso. El precalentamiento consiste en calentar el molde a una temperatura controlada antes de vaciar el aluminio en él (Escobar Ruiz, 2021).

Molde de Arena Verde

Un molde compuesto de arena, bentonita y agua compactada que recibe el nombre “verde” al no someterse a un secado térmico ni curado. Por ello la mezcla conserva humedad al verterse el metal fundido en el molde. Ofrece una calidad de acabado superficial regular, más baja en comparación a los siguientes moldes. (Carrión Vargas, 2020).

Molde de Yeso

El molde de yeso es un sistema desechable de alta precisión para fundir metales no ferrosos como el aluminio. Se fabrica vertiendo una mezcla líquida de yeso, agua y aditivos

refractarios sobre un modelo para copiar con exactitud sus formas. Exige un horneado previo para eliminar toda la humedad y evitar burbujas de gas, y al tener una baja transferencia de calor, enfría el metal lentamente, garantizando piezas con un acabado superficial excelente y dimensiones exactas (Zurita, 2025; Cosíos Espinosa, 2019).

Molde de Acero

El molde de acero es un sistema de moldeo permanente compuesto por dos o más secciones maquinadas que se abren y cierran y una cavidad interna almacena la forma de la pieza que soporta el severo choque térmico del metal líquido. Este molde permite una solidificación rápida que da como resultado una estructura de grano fino y piezas con un acabado superficial impecable. Su uso está orientado a la producción masiva de componentes de tamaño pequeño a moderado y destacando por su gran precisión dimensional y su alta rentabilidad económica a gran escala (Castro Lisintuña, 2012; Puerres Guilcazo & Toledo Picoita, 2008).

Temperaturas de 850°C, 950°C y 1050°C

El aluminio posee un punto de fusión de 660.32 °C, al llegar a esta temperatura comienza el cambio de estado del metal a líquido. El incremento de esta temperatura en la fundición de latas de aluminio mejora la eficiencia y pureza del metal recuperado. Diversas investigaciones demuestran que elevar la temperatura de operación —en rangos que van desde los 700 °C hasta los 850 °C— maximiza la tasa de recuperación hasta alcanzar un óptimo del 96.6% al 97.65% de pureza. Este comportamiento se debe a que las altas temperaturas mejoran la eliminación de capas de pintura, disminuyen la pérdida de magnesio por fusión y optimizan la lixiviación ácida de la escoria. Por este motivo se usaron temperaturas de 850, 950 y 1050°C para el desarrollo de las pruebas (Verran & Kurzawa, 2008; Cortés Aparicio, 2024).

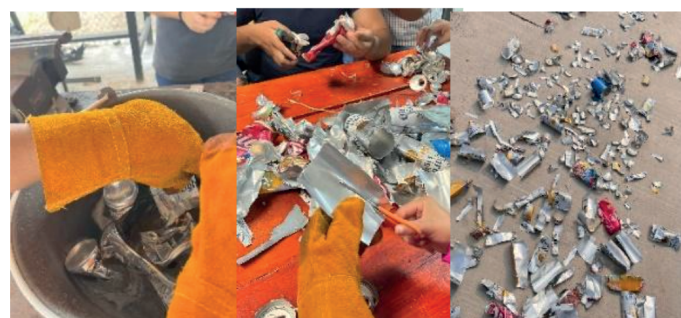
C. Descripción del Sistema

1. El proceso de transformación de latas de aluminio recicladas en lingotes se rige por un sistema que integra la gestión de seguridad, el control térmico de fases y la verificación de propiedades mecánicas (Cruz Castro, 2024). En la etapa inicial, la prioridad se centra en la integridad del operador y el acondicionamiento de la materia prima para ello, es indispensable el uso de equipo de protección personal especializado que consta de careta, gafas, mangas, chaleco y guantes de alta resistencia. El uso del EPP es específicamente para proteger la integridad física del operario frente a los riegos mecánicos y térmicos extremos del entorno (Colegio Médico de Chile & Sociedad Chilena de Infectología, 2020).



Fig. 1. Uso de equipo de Protección Personal

2. El material recolectado pasa por un riguroso saneamiento para eliminar todos los contaminantes superficiales como fluidos remanentes, polvo y residuos. Una vez limpio, las latas de aluminio se cortan manualmente con herramientas de corte para optimizar el espacio en el crisol y se someten a un secado absoluto para mitigar el riesgo de humedad al entrar al horno. Si el aluminio húmedo entra en contacto con el crisol a alta temperatura podrían ocurrir proyecciones violentas (Flores García & Orellana Núñez, 2014; Cruz Castro, 2024).



No venía descripción en el archivo

3. El horno de fundición juega el rol central encargado de procesar la carga del metal, la elección adecuada del equipo representa una decisión muy importante dentro del proceso (Etcheverry Castro, 2013; Morales Cevallos, 2021). El horno de crisol es un sistema de calentamiento diseñado para fundir metales con puntos de fusión bajos moderados a través de la transferencia de calor indirecta.

Su característica principal es que la carga metálica se deposita y se aísla por completo dentro de un recipiente de alta resistencia térmica y química llamado crisol (Calvo, 2015; Flores García & Orellana Núñez, 2014). Sabiendo esto el siguiente paso es precalentar el horno hasta una temperatura mayor a los 660° C posteriormente comenzar a introducir la materia prima en el crisol y esperar el cambio del estado de materia a líquido (Cortés Aparicio, 2024; Cruz Castro, 2024).



Fig. 3. Ingreso de materia prima en crisol

4. Durante el proceso de fundición debido a la naturaleza del aluminio reciclado emergen impurezas y óxidos que forman una capa de escoria en la superficie. La escoria es el residuo sólido y vítreo que genera como subproducto durante el proceso de fusión térmica de los metales (Verran & Kurzawa, 2008). Por esto se debe eliminar todo residuo que se presente, de forma cuidadosa con una herramienta que mantenga cierta distancia del operario con el crisol y colocarla en un lugar apto para su desecho (Morales Cevallos, 2021; Cruz Castro, 2024).



5. Posteriormente, se ejecuta el vaciado bajo condiciones controladas de transferencia térmica. Los moldes destinados a recibir el metal — yeso, arena y acero— se someten a un precalentamiento uniforme sobre una parrilla, lo que previene problemas térmicos que pueden fracturar los moldes o provocar una solidificación prematura del flujo (Ramírez Sánchez, 2019). El aluminio líquido se vierte con precisión dentro de las cavidades y se transfiere a un área de reposo donde se disipa el calor de manera natural hasta lograr la solidificación y forma geométrica deseada de las piezas (Zurita, 2025;



No venía descripción en el archivo

6. Una vez solidificados y desmoldados de lingotes, se procede a la eliminación de rebabas, imperfecciones y restos de escoria mediante procesos mecánicos de lijado, desbaste y de tratamientos. El pulido es un procedimiento abrasivo que se utiliza para retirar pequeñas cantidades de material de una superficie, con el fin de obtener un acabado preciso, uniforme y completamente liso. Además este proceso contribuye a mejorar la resistencia al desgaste de la pieza y favorece un mejor sellado. (Satillan Valdelamar, Dimas Diaz, & Serrano Gonzalez, 2009). Así mismo los tratamientos mecánicos implican la remoción física de suciedad e incrustaciones de una pieza, la remoción de rebabas y el mejoramiento del acabado superficial. Para el acabado superficial de los lingotes se utilizó una fresadora convencional, empleada para realizar operaciones de fresado de acabado con el propósito de eliminar imperfecciones superficiales y mejorar la calidad final de la pieza. Este proceso de mecanizado permite reducir la rugosidad superficial y obtener superficies con mejores característica dimensionales y funcionales, siendo una operación ampliamente utilizada en la manufactura de componentes metálicos (Kalpakjian & Schmid, 2008; Groover, 2010).

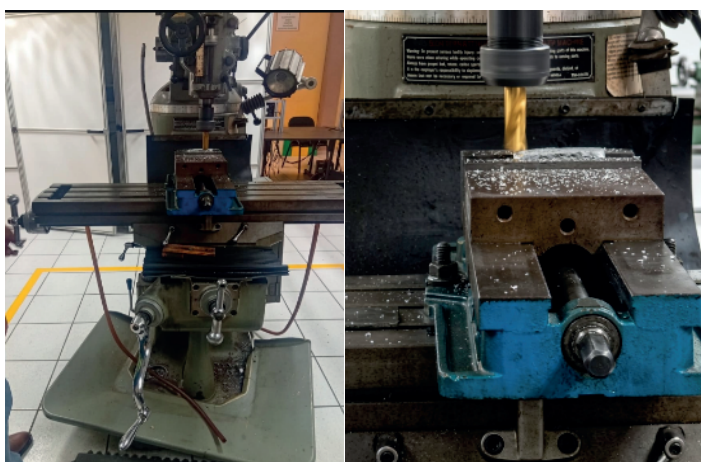


Fig. 6. Fresadora convencional.

7. Se realiza pruebas de dureza una vez desmoldados los lingotes. La dureza es la resistencia de la superficie de un material al ser rayado o penetrado bajo una fuerza estática ejercida por un objeto que no sufre deformaciones (Aristizábal & Manrique, 2017). A nivel industrial, la evaluación de la dureza se posiciona como un pilar fundamental para la elección de materiales y el aseguramiento de la calidad. Se manifiesta de forma intrínseca como una característica superficial, es precisamente esta resistencia en la superficie la que define el éxito, el rendimiento y la durabilidad del material en su aplicación real (Santos et al., 2001).

Para realizar esta prueba se utiliza un durómetro que es un instrumento de medición encargado de medir la dureza de los materiales. Técnicamente, funciona aplicando una fuerza controlada sobre la superficie de un material a través de una pieza llamada indentador o penetrador al medir la huella o la profundidad de la marca dejada en la superficie, el equipo determina qué tan resistente es ese material a ser deformado o penetrado (Perilla et al., 2021). Se utiliza la escala HLD (Hardness Leeb Diamond), que es un método portátil y no destructivo que mide la dureza de un material principalmente aceros, mediante el impacto y rebote de una punta de diamante (ASTM International, 2023).



III. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y de carácter experimental, orientado a determinar la influencia de las variables críticas en el proceso de fundición. Para fundamentar el marco experimental, se llevó a cabo una búsqueda y revisión sistemática de fuentes bibliográficas, la cual comprendió: Revistas científicas indexadas, trabajos de investigación previos y documentos técnicos y normativos.

Caracterización de la Muestra y Control de Insumos

Para garantizar la trazabilidad y la reproducibilidad del proceso de fundición, se establecieron las siguientes especificaciones:

- **Materia prima:** Se utiliza aluminio proveniente de latas de desecho, estandarizando la proporción de carga metálica por colada para minimizar variaciones en la composición química inicial.

- **Control del insumo:** Se realiza una inspección visual y limpieza previa de las latas para retirar agentes contaminantes externos que puedan generar porosidad o inclusiones no metálicas en los lingotes.

Diseño Experimental (DOE)

Para evaluar de manera sistemática el impacto de las variables del proceso sobre la dureza de los lingotes de aluminio reciclado, se implementó una metodología de Diseño de Experimentos (DOE):

- **Factores y niveles de estudio:** Se configuró un diseño factorial 3^2 con una réplica, evaluando dos factores principales en tres niveles cada uno:

1. **Temperatura de colada (Factor 1):** Establecida en tres niveles específicos de operación: 850 °C (nivel bajo), 950 °C (nivel medio) y 1050 °C (nivel alto).

2. **Tipo de molde (Factor 2):** Evaluado en tres configuraciones materiales distintas: acero, arena verde y yeso.

- **Combinaciones experimentales:** Se realizaron las coladas correspondientes combinando de manera sistemática cada nivel de temperatura con cada uno de los tipos de molde.

Procedimiento Experimental y Control de Variables

Las etapas del proceso de fundición y moldeo se ejecutan bajo estrictas condiciones de control para asegurar la estabilidad y seguridad del experimento:

- **Fusión y control térmico:** El proceso de fusión se lleva a cabo utilizando un horno eléctrico, lo que permite un control riguroso y preciso de la temperatura de la colada para alcanzar los valores exactos definidos en el diseño experimental.

- **Acondicionamiento de moldes:** Previo al vaciado, los moldes de acero, arena verde y yeso se someten a un proceso de precalentamiento en una parrilla de carbón, con la finalidad de mitigar el gradiente térmico y prevenir choques térmicos abruptos al momento del vertido del metal fundido.

Evaluación de Propiedades Mecánicas y Validación Estadística

Con el propósito de determinar las propiedades mecánicas de las piezas obtenidas y validar rigurosamente los resultados, se procede de la siguiente manera:

- **Preparación superficial:** Se realiza el desbaste y planeado de las muestras utilizando una fresadora convencional, asegurando superficies metálicas limpias, planas y paralelas para los ensayos.

- **Medición de dureza:** Se emplea un durómetro digital con escala de medición HLD, tomando múltiples indentaciones por probeta en ubicaciones estandarizadas para obtener un valor representativo y evaluar la dispersión de los datos.

- **Análisis estadístico:** Los datos obtenidos se someten a un análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de efectos principales e interacciones derivados del diseño factorial 3^2 , verificando la significancia estadística de los modelos ajustados.

IV. RESULTADOS

IV.1 análisis del diseño experimental

En esta sección se exponen y discuten los resultados obtenidos a partir del diseño de experimentos aplicado para evaluar la influencia del tipo de molde y la temperatura de vertido sobre la dureza de las piezas obtenidas mediante el reciclaje de aluminio.

Se presentan los resultados del estudio experimental que analiza la dureza de los lingotes de aluminio recuperado en relación con las variables fundamentales: el tipo de molde y la temperatura de fundición o tratamiento.

La tabla 1 muestra las variables experimentales y los resultados de dureza, se realizan 9 corridas con 1 réplica, dando un total de 18 tratamientos. La tabla incluye columnas adicionales como OrdenEst (orden estándar), OrdenCorrida (orden de ejecución), Bloques y TipoPt, lo que indica que se siguió un diseño experimental estructurado para garantizar la validez de las mediciones y el análisis estadístico posterior.

Tabla 1. Datos recopilados.

#	C1-T Molde	C2 Temperatura	C3 Dureza (HLD)	C4 OrdenEst	C5 OrdenCorrida	C6 Bloques	C7 TipoPt
1	yeso	850	154	1	1	1	1
2	yeso	950	200	2	2	1	1
3	yeso	1050	183	3	3	1	1
4	arena	850	185	4	4	1	1
5	arena	950	175	5	5	1	1
6	arena	1050	116	6	6	1	1
7	acero	850	184	7	7	1	1
8	acero	950	199	8	8	1	1
9	acero	1050	184	9	9	1	1
10	yeso	850	148	10	10	1	1
11	yeso	950	184	11	11	1	1
12	yeso	1050	157	12	12	1	1
13	arena	850	158	13	13	1	1
14	arena	950	181	14	14	1	1
15	arena	1050	149	15	15	1	1
16	acero	850	200	16	16	1	1
17	acero	950	190	17	17	1	1
18	acero	1050	171	18	18	1	1

A continuación, se presenta la interpretación ¿técnica análisis de varianza ANOVA (Tabla 2) de los resultados obtenidos: el modelo global presenta un valor p de 0.018 lo que indica que es estadísticamente significativo ($p < 0.05$). Esto confirma que las variaciones observadas en la dureza no son producto del azar, sino que responden a los cambios en las variables independientes. El molde muestra una influencia directa y significativa con el valor p de 0.020. La temperatura resulta ser igualmente crítica, con un valor p de 0.01, consolidándose como un factor determinante en el proceso. La interacción entre el molde y la temperatura obtuvo un valor p de 0.095. Al situarse por encima del umbral de 0.05, se determina que no existe una interacción significativa entre ambos factores; esto significa que el efecto de la temperatura sobre la dureza es consistente independientemente del tipo de molde utilizado, y viceversa.

Variación del modelo: 6729, esta es la parte de los cambios que sí sabemos por qué ocurrieron. Representa aproximadamente el 80% de la variabilidad total, lo que significa que el experimento fue muy efectivo para identificar las causas de la dureza. El error: 1664, esta es la parte de los cambios que no podemos explicar con los factores estudiados. Se debe al azar, a pequeñas variaciones inevitables en las mediciones o factores externos que no se controlaron.

Tabla 2. Análisis de varianza

<i>Fuente</i>	<i>G L</i>	<i>SC Ajust</i>	<i>MC Ajust.</i>	<i>Valo r F</i>	<i>Valo r p</i>
Modelo	8	6729	841.1	4.55	0.018
Lineal	4	4693	1173.1	6.35	0.010
Molde	2	2286	1142.9	6.18	0.020
Temperatura	2	2407	1203.4	6.51	0.018
Interacciones de 2 términos	4	2037	509.1	2.75	0.095
Molde*Temperatura	4	2037	509.1	2.75	0.095
Error	9	1664	184.9		
Total	17	8393			

Resumen del modelo: La R-cuadrado es de 80.17%. Es el valor indica que el modelo es capaz de explicar el 80.17% de la variabilidad en la dureza. El S de 13.5974 Representa la desviación estándar de los residuos; en términos sencillos, es el "error típico" o la distancia promedio que existe entre los datos reales y las predicciones del modelo. El R-cuadrado ajustado (62.55%): Es una medida más conservadora que ajusta el resultado según el número de factores incluidos, conformando que el modelo sigue siendo solido incluso bajo criterios más estrictos.

Tabla 3. Resumen del modelo

<i>S</i>	<i>R-cuadrado</i>	<i>R-cuadrado(ajustado)</i>	<i>R-cuadrado (pred)</i>
13.5974	80.17%	62.55%	20.70%

La interpretación de las tendencias de los efectos principales en la fig. 8.

Efecto del molde: La gráfica muestra que la elección del material del molde tiene un impacto drástico en el resultado. El molde de acero destaca claramente como el nivel más efectivo logrando la media de fuerza más alta, situándose muy por encima de la media general del experimento. En contraste, el molde de arena produce los valores más bajos mientras que el yeso ocupa una posición intermedia.

El comportamiento de la temperatura revela una tendencia no lineal de gran importancia para el control del proceso. Se observan un incremento significativo de la dureza al pasar de 850°C a 950°C donde se alcanza el pico máximo de respuesta. Sin embargo al elevar la temperatura a 1050 unidades ocurre un descenso pronunciado al punto de menor dureza para este factor. La línea horizontal discontinua sirve como punto de comparación. Los puntos por encima de esta línea representan las condiciones que maximizan la dureza mientras que los puntos por debajo representan las condiciones que la minimizan.

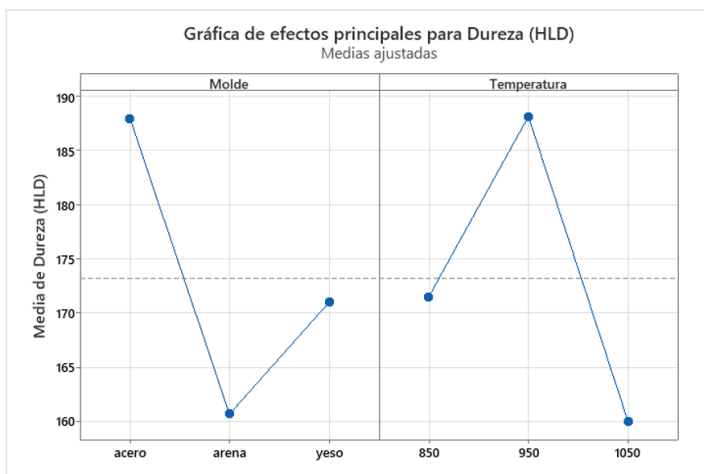


Fig. 8. Efectos principales.

Consiguiente se analiza la gráfica de interacción (fig. 9.). Principalmente, se destaca un cambio de pendiente inverso entre las temperaturas de 850°C y 950°C al pasar de moldes de arena a yeso, así como un marcado descenso en la dureza para la temperatura de 1050°C cuando se utiliza el molde de arena sin embargo el tamaño de la muestra no permiten confirmar con total certeza estadística que el efecto de la temperatura dependa del tipo de molde.

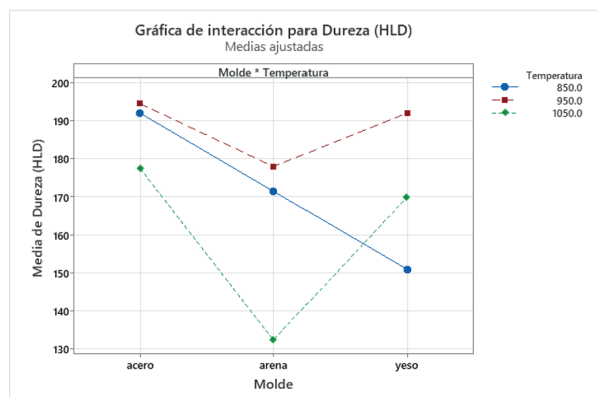


Fig. 9. Gráfica de interacción

Por último, la configuración óptima Fig. 10. identificada en este caso el modelo determina que la dureza máxima se alcanza utilizando un molde de acero a una temperatura de 950 unidades. La predicción de la respuesta (y) tiene valor=194.50. Este número representa la dureza (HLD) que el modelo predice que se obtendrá de manera consistente si se siguen exactamente las condiciones óptimas señaladas.

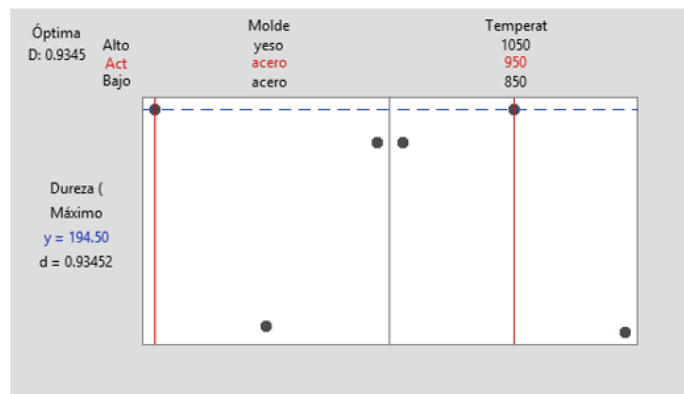


Fig. 10. Gráfica de Optimización

V. DISCUSIÓN

Para que el reciclaje y la fundición de aluminio recuperado de latas se consoliden realmente como una herramienta de sostenibilidad y alto rendimiento, es necesario trascender la perspectiva de la simple gestión de residuos. Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que el proceso de fundición no solo cumple una función de limpieza ambiental, sino que actúa como un método de optimización mecánica con las condiciones adecuadas.

Al lograr una dureza máxima de 194.5 HLD bajo la configuración óptima de moldes de acero permanentes y temperatura de 950° C se valida la transformación de simples envases de bebida en recursos de alto valor. Este hallazgo revela un salto cualitativo fundamental respecto a las propiedades de partida del material. Las latas de desecho, compuestas originalmente por aleaciones de las series 3000 y 5000, presentan una dureza inicial que oscila apenas entre 60 HLD y 100 HLD (AIGA; VDA, 2019). El incremento sustancial en la dureza final señala que el material procesado es plenamente apto para aplicaciones reales donde la resistencia al desgaste constante y al rayado son críticas, tales como joyería artesanal y hebillas, poleas y volantes manuales, mangos de herramientas, artículos para el hogar; manijas para puertas, pomos de cajones, ceniceros, marcos para espejos y utensilios de cocina.

Esta situación resulta altamente prometedora si se considera la realidad económica y logística de países con altas tasas de recuperación de aluminio como México y Brasil, donde el flujo de residuo es constante y masivo, esto garantiza la rentabilidad económica y la viabilidad, disminuyendo la dependencia de extracción de aluminio virgen.

VI. CONCLUSIONES

Las revisiones recientes a nivel global advierten sobre la necesidad de migrar hacia economías circulares eficientes que aseguren la pureza y el desempeño de los materiales reciclados. En este sentido, la combinación de una temperatura controlada a 950 °C y el uso de moldes metálicos asegura la calidad metalúrgica necesaria para que este metal sea reinsertado con éxito en la fabricación de componentes de precisión y productos de uso cotidiano. De este modo, los datos experimentales de este estudio confirman que el éxito y la durabilidad del aluminio recuperado están directamente ligados al control de sus parámetros de procesamiento, abriendo la pauta para un aprovechamiento tecnológico sustentable y de alto rendimiento en la manufactura.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su más sincero agradecimiento a la Profesora Rosa María Martínez Robles. Así como a los docentes que fungieron como asesores. También a los alumnos de 6to semestre de Ingeniería Industrial del ITS RV generación 2023 por su participación activa. ¡Muchas Gracias!

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Raabe, D., Ponge, D., Uggowitzer, P. J., Roscher, M., Paolantonio, M., Liu, C., Antrekowitsch, H., Kozeschnik, E., Seidmann, D., Gault, B., De Geuser, F., Deschamps, A., Hutchinson, C., Liu, C., Li, Z., Prangnell, P., Robson, J., Shanthraj, P., Vakili, S., ... Pogatscher, S. (2022). Making sustainable aluminum by recycling scrap: The science of "dirty" alloys. *Progress in Materials Science*, 128, 100947. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.100947>
2. Jiang, L., Marceau, R. K. W., & Dorin, T. (2023). Improved iron-tolerance in recycled aluminum alloys via direct strip casting process. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2310.06327>
3. Montgomery, D. C. (2019). *Design and analysis of experiments* (10th ed.). John Wiley & Sons.
4. Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología* (5ª ed.). Pearson Educación.
5. Groover, M. P. (2010). *Fundamentos de manufactura moderna* (4ª ed.). McGraw-Hill.
6. AIAG, & VDA. (2019). *FMEA handbook: Design FMEA, Process FMEA, and FMEA-MSR*. Automotive Industry Action Group.
7. Aristizábal, C., & Manrique, T. M. (2017). *Ensayos de dureza*. Pontificia Universidad Javeriana.
8. ARPAL. (2003). *Estudio sobre la Recuperación de Envases de Aluminio*. https://www.aluminio.org/files/informe_arpal_2003.pdf
9. ASTM International. (2023). *ASTM A956/A956M-22: Standard test method for Leeb hardness testing of steel products*. https://doi.org/10.1520/A0956_A0956M-22
10. Calvo, C. (2015). Hornos utilizados en la fabricación de aleaciones ferrosas y no ferrosas. *Scientia*, 17(17). <https://doi.org/10.31381/scientia.v17i17.388>
11. Carrión Vargas, M. V. (2020). *Estudio de la influencia del tipo de arena en el llenado de un molde en arena verde, para la fundición de un disco de freno, a través de la simulación CFD* [Tesis de licenciatura, Universidad Internacional SEK]. <https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/4007>
12. Castro Lisintuña, C. D. (2012). *Construcción de un molde metálico (coquilla) con noyo para la producción en serie de piezas en aleaciones de aluminio* [Tesis de ingeniería, Escuela Politécnica Nacional]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4966>
13. Cortés Aparicio, Y. I. (2024). *Caracterización y reciclaje de latas de aluminio: Evaluación de las propiedades mecánicas y estructurales de sus componentes tras el proceso de fundición y análisis de la escoria resultante* [Tesis de licenciatura, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/21330>
14. Cosíos Espinosa, D. F. (2019). *Estudio del proceso de fundición de aleaciones no ferrosas en moldes de yeso* [Trabajo de titulación, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. <https://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/46303>
15. Cruz Castro, D. (2024). *Diseño y construcción de un horno de fundición para la manufactura de lingotes de aluminio* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México]. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/142177>

15. Cruz Castro, D. (2024). Diseño y construcción de un horno de fundición para la manufactura de lingotes de aluminio [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México]. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/142177>
16. Colegio Médico de Chile, & Sociedad Chilena de Infectología. (2020). Recomendaciones de uso de Elementos de Protección Personal (EPP) para los trabajadores de la salud. *Revista Chilena de Infectología*, 37(2), 106-110. <https://doi.org/10.4067/S0716-10182020000200106>
17. European Aluminium Association. (2008). Aluminio y Salud. <https://www.asoc-aluminio.es/support/pdf/aluminio-medioambiente.pdf>
18. Escobar Ruiz, M. A. (2021). Modelación y simulación del proceso de fundición para el zinc y aluminio [Tesis de licenciatura, Universidad Técnica de Cotopaxi]. <https://repositorio.utc.edu.ec/items/7babcd25-9557-422e-9bd3-76068181331b>
19. Etcheverry Castro, J. A. (2013). Modelo de gestión para la optimización del proceso de conversión de la fundición Chuquicamata [Tesis de maestría, Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/114304>
20. Flores García, E., & Orellana Núñez, R. (2014). Diseño y construcción de un horno de crisol para aleaciones no ferrosas [Trabajo de grado, Universidad de El Salvador].
21. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2020). Metodología para la identificación y cuantificación de acciones de mitigación por el reciclaje de residuos sólidos urbanos. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/644839/102_2020_Metodologia_acciones_mitigacion_reciclaje_residuos_solidos_urbanos.pdf
22. International Aluminium Institute. (2024, 21 de marzo). Global aluminium can recycling reaches 75% marking major step toward circular economy. <https://international-aluminium.org>
23. Morales Cevallos, J. W. (2021). Análisis energético en el proceso de fundición del aluminio en el horno del Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi [Trabajo de titulación, Universidad Técnica de Cotopaxi]. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/8201>
24. Ospina, G. M., Chaves, P., & Jiménez, S. (2020). Mejoramiento de subrasantes de tipo arcilloso mediante la adición de escoria de acero. *Revista Investigación, Desarrollo e Innovación*, 11(1), 185-196. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S2027-83062020000200185&script=sci_arttext&lng=es
25. Paucar Pinto, C. (2023). Síntesis y caracterización de policloruro de aluminio a partir de aluminio reciclado [Trabajo de titulación, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <https://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/19942>
26. Perilla, R. A., Martínez, F. O., & Espeleta, A. C. (2021). Diseño de un prototipo de laboratorio de dureza dedicado a la calibración de durómetros, por métodos Rockwell, Brinell, Vickers y Shore [Informe de investigación, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. <https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/d1c2a2ce-ac49-4424-ae57-37832568f403/content>
27. Puerres Guilcazo, R. A., & Toledo Picoita, E. (2008). Construcción de un molde de acero por mecanizado para fundición de poleas en aleaciones de aluminio [Trabajo de titulación, Escuela Politécnica Nacional]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2000>
28. Ramírez Sánchez, A. (2019). Alternativas para el calentamiento de moldes en procesos de fundición por gravedad en aleaciones de aluminio-silicio [Trabajo fin de grado, Universidad de Zaragoza]. Repositorio Institucional Zaguán. <https://zaguan.unizar.es/record/85036>
29. Rodríguez Meza, A. R. (2021). Métodos alternativos ante la violación de supuestos en diseños de experimentos factoriales. *Anales Científicos*, 82(2), 318-335. <https://doi.org/10.21704/ac.v82i2.1795>
30. Santos, E., Yenque, J., Rojas, O., & Rosales, V. (2001). Acerca del ensayo de dureza. *Industrial Data*, 2(4), 73-80. <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/idata/article/view/6333>
31. Satillán Valdelamar, M., Dimas Díaz, F., & Serrano González, S. (2009). Diseño y evaluación de una pulidora de piezas de fundición usando maíz como abrasivo. *Ingenierías*, 1(2), 5-12.
32. Verran, G., & Kurzawa, U. (2008). An experimental study of aluminum can recycling using fusion in induction furnace. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(5), 731-736. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.11.001>
33. Zurita, R. E. (2025). Proceso de solidificación de aluminio empleando tres diferentes tipos de moldes. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 13(Especial 2), 131-138. <https://doi.org/10.29057/icbi.v13iEspecial2.14918>



Ing. Carlos Santiago Zúñiga Colunga es Ingeniero en Sistemas Computacionales por el ITS RV e Ingeniero Industrial por el ITSSLP Capital. Actualmente es Docente e Investigador en el ITS RV. Líneas de investigación incluyen calidad y productividad en los procesos

industriales y sistemas de producción agrobiotecnológica. Ha participado en proyectos financiados por el TECN M en 2025 y 2026 de los cuales se derivan dos solicitudes de patente ante el IMPI. Actualmente cursa la Maestría en Educación con Especialidad en Metodología de la docencia.



Juana Fernanda Briceño Avalos es estudiante de sexto semestre de Ingeniería Industrial en el Instituto Tecnológico Superior de Río Verde (ITS RV), con especialización en Calidad y Procesos de Producción. Actualmente se desempeña como

investigadora en formación y es participante activa del programa Verano Científico 2026. Sus líneas de interés académico e investigación se centran en la experimentación de procesos de manufactura y proyectos orientados al desarrollo sustentable.



Ivan Ortega García es estudiante de sexto semestre de Ingeniería Industrial en el Instituto Tecnológico Superior de Río Verde (ITS RV), con especialización en Calidad y Procesos de Producción. Actualmente se desempeña como

investigador en formación y es participante activo del programa Verano Científico 2026. Sus líneas de interés académico e investigación se centran en la experimentación de procesos de manufactura y proyectos orientados al desarrollo sustentable.



Ing. David Mata Noyola. Actualmente está cursando el Doctorado en Formación Empresarial y Educación por la Universidad de Estudios del Potosí (CUNEP). Se desempeña como investigador y docente en el TecNM, Campus Rioverde, donde

obtuvo el título de Ingeniero Industrial con especialidad en Procesos y Calidad. Sus líneas de investigación se centran en la Calidad y Productividad en los Procesos Industriales y en los Sistemas de Producción Agrobiotecnológica, en las que colabora en proyectos con potencial de ser patentados.



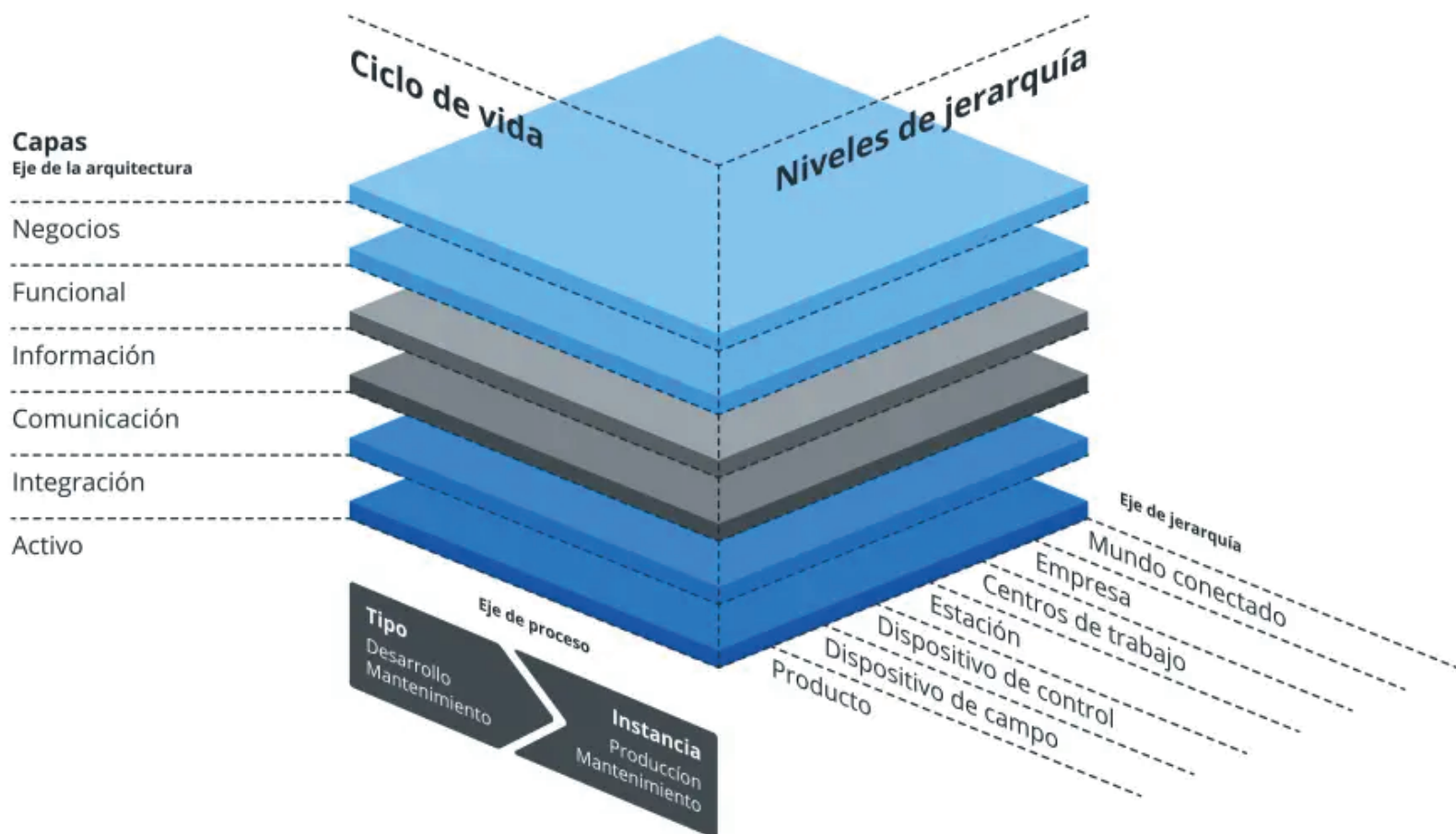
Ing. Luz Alejandra López Chávez, egresada de la carrera de Ingeniería Industrial por el ITS RV, es Jefa de División de dicho programa. Ha demostrado liderazgo en la docencia impartiendo materias de calidad, seguridad ocupacional y tecnología en

diversas ingenierías. Destaca su rol como responsable de la acreditación por CIEES de Ingeniería Industrial, logrando un dictamen favorable por cinco años. Además, contribuye a la mejora continua institucional como auditora interna del Sistema de Gestión de Calidad.



Integración de Metodología PDCA y Arquitectura RAMI 4.0 Para Desarrollo de SCADA: un Caso de Estudio.

Ejes del RAMI 4.0



S Y D L E

Vargas Franco Jaime David¹, vargas.jd.55@gmail.com

García Arredondo José Alejandro¹, algarcia@ciateq.mx

¹CIATEQ A.C Centro de tecnología avanzada, Circuito Aguascalientes Norte

ABSTRACT.

This article presents a methodological framework based on the integration of the Reference Architecture Model for Industry 4.0 (RAMI 4.0) and the Plan-Do-Check-Act (PDCA) cycle for the implementation of a SCADA system in an automotive assembly line guided by autonomous vehicles (AGVs) and 7 charging stations. The assembly line exhibited high recovery times per event (10–20 minutes), recurring failures due to battery discharge, and low operational visibility of the status of the AGVs and charging stations, which kept OEE below the target.

The proposed solution included a modular architecture with Omron PLCs, industrial connectivity via WLAN networks, and a data integration layer using the OPC Industrial Gateway Server (IGS), enabling real-time monitoring through GE Cimplicity and Proficy WebSpace in the automotive body assembly line. The methodological approach allowed the solution to be implemented in an orderly manner with a continuous improvement process aligned with Industry 4.0 principles.

Based on RAMI 4.0, enabling technologies were integrated at the Asset, Integration, and Information levels, including cyber-physical systems within the cell, advanced infrared communication sensors for AGV interaction with checkpoints, industrial communication via OPC UA, IIoT infrastructure, and a SCADA system to visualize and monitor data in real time.

The use of PDCA enabled planning, implementation, verification, and standardization at each stage of the project, ensuring systematic performance control and continuous system improvement. As a result, coherent technology integration, full information traceability, and a more stable and efficient operation were achieved.

The implementation yielded significant improvements, including a 7.7% increase in Overall Equipment Effectiveness (OEE), a reduction in Mean Time to Repair (MTTR) from 10–20 minutes to 5–8 minutes, and a 30.8% decrease in AGV fast-charging time. These results validate the integration of RAMI 4.0 and PDCA as an effective framework for driving digital transformation and operational efficiency in smart manufacturing environments.

Keywords:

Industry 4.0, RAMI 4.0, PDCA, SCADA systems, Smart Factory, AGVs, digital transformation.

RESUMEN

Este artículo presenta un marco metodológico basado en la integración de la Arquitectura de Referencia para la Industria 4.0 (RAMI 4.0) y el ciclo Planear-Hacer-Verificar-Actuar (PDCA) para la implementación de un sistema SCADA en una línea de ensamble automotriz guiada por vehículos autónomos (AGVs) y 7 estaciones de carga. La línea de ensamble presentaba tiempos de restablecimiento elevados por evento (10–20 min), fallas recurrentes por descarga de baterías y baja visibilidad operativa del estado de los AGVs y las estaciones de carga, lo que mantenía el OEE por debajo del objetivo. La solución propuesta incluyó una arquitectura modular con PLCs Omron, conectividad industrial mediante redes WLAN y una capa de integración de datos mediante el servidor OPC Industrial Gateway Server (IGS), habilitando el monitoreo en tiempo real a través de GE Cimplicity y Proficy WebSpace en la línea de ensamble automotriz de carrocerías. El enfoque metodológico permitió implementar la solución de manera ordenada y con un proceso de mejora continua alineado con los principios de la Industria 4.0. Con base en RAMI 4.0, se integraron tecnologías habilitadoras en los niveles de Asset, Integration and Information (Activos, integración e información), incluyendo los sistemas ciber-físicos de la celda, sensores avanzados de comunicación infrarroja para comunicar los AGVs con los puntos de control, comunicación industrial mediante OPC UA, infraestructura IIoT y un sistema SCADA para visualizar y monitorear los datos en tiempo real. El uso del PDCA permitió planificar, implementar, verificar y estandarizar cada etapa del proyecto, asegurando un control sistemático del desempeño y una mejora constante del sistema. Como resultado, se logró una integración coherente de la tecnología, una trazabilidad completa de la información y una operación más estable y eficiente. La implementación logró mejoras significativas, incluyendo un aumento del 7.7 % en la Eficiencia Global de los Equipos (OEE), una reducción del Tiempo Medio de Reparación (MTTR) de 10–20 minutos a 5–8 minutos, y una disminución del 30.8 % en el tiempo de carga rápida de los AGVs. Estos resultados validan la integración de RAMI 4.0 y PDCA como un marco eficaz para impulsar la transformación digital y la eficiencia operativa en entornos de manufactura inteligente.

Palabras clave:

Industria 4.0, RAMI 4.0, PDCA, sistemas SCADA, fábrica inteligente, AGVs, transformación digital.

INTRODUCCIÓN

La transformación digital en los entornos industriales ha redefinido los sistemas de manufactura hacia mayores niveles de conectividad, automatización y toma de decisiones basada en datos. En este contexto, el paradigma de Industria 4.0 impulsa sistemas productivos inteligentes e interconectados (smart factories), donde la convergencia de tecnologías digitales, sistemas ciberfísicos, IIoT y plataformas de supervisión constituye un habilitador clave para elevar la eficiencia operativa y la capacidad de adaptación de los procesos productivos [1], [15], [16]. Esta evolución también ha sido reforzada por estudios recientes sobre digitalización industrial e integración IT/OT, los cuales destacan que la adopción de arquitecturas interoperables y orientadas a datos es un requisito central para la modernización de sistemas de manufactura complejos [22], [23].

Para habilitar esta transición se requieren marcos que estandaricen la integración tecnológica y, al mismo tiempo, estructuren los procesos bajo un enfoque de mejora continua. En este sentido, la arquitectura RAMI 4.0 establece un modelo tridimensional que organiza un sistema productivo considerando el ciclo de vida del producto, los niveles jerárquicos de automatización y las capas funcionales, facilitando la interoperabilidad entre sistemas heterogéneos [2]. De manera complementaria, el ciclo PDCA (Plan–Do–Check–Act) proporciona una estrategia iterativa para la mejora continua, y su extensión conceptual hacia PDCA 4.0 permite automatizar la retroalimentación y acelerar la toma de decisiones basada en datos mediante herramientas digitales [3]. Estas aproximaciones se ven fortalecidas por investigaciones recientes sobre digitalización del ciclo de mejora continua y adopción de tecnologías en casos reales de manufactura, donde se reporta que la integración entre marcos arquitectónicos y metodologías iterativas favorece la implementación ordenada y evaluable de soluciones de automatización [17], [22].

En la línea de ensamble automotriz analizada —guiada por 60 AGVs y con 7 estaciones de carga— se identificaron brechas críticas: MTTR de 10–20 min por evento, fallas recurrentes por descarga de baterías, baja visibilidad operativa del estado de los AGVs y de las estaciones de carga, así como limitaciones en la trazabilidad de los datos necesarios para la toma de decisiones. Estas condiciones

mantenían el OEE por debajo del objetivo operativo y afectaban la estabilidad del proceso. Para estructurar la solución, se tomó como base RAMI 4.0, en concordancia con trabajos que muestran su utilidad para organizar activos, integrar funciones y favorecer la interoperabilidad en entornos de manufactura digital [2], [12], [19]. En paralelo, la estrategia de mejora se apoyó en el ciclo PDCA adaptado a entornos digitales, siguiendo enfoques que destacan su valor para validar, ajustar y estandarizar soluciones basadas en datos dentro de sistemas ciberfísicos [3], [11], [17].

Con base en estos fundamentos, se diseñó e implementó una arquitectura SCADA soportada en PLC Omron, un servidor OPC (IGS) y comunicaciones FINS Ethernet/WLAN, orientada a incrementar el OEE a un valor superior al 90 %, reducir el MTTR a menos de 10 min y garantizar la trazabilidad completa de eventos e indicadores. La selección de OPC como capa de integración es consistente con la literatura especializada sobre interoperabilidad industrial, donde se le reconoce como un estándar clave para habilitar el intercambio estructurado de datos entre sistemas de control y supervisión [4]. A ello se suman contribuciones recientes sobre modelos de información OPC UA y adquisición de datos distribuida, que subrayan la importancia de contar con semántica consistente y estructuras escalables para soportar arquitecturas industriales modernas [24], [26].

Este artículo presenta un caso de estudio aplicado en una línea de ensamble automotriz de origen japonés, operada mediante AGVs y basada en una arquitectura de control compuesta por PLC Omron, módulos CJ1W-CIF41, redes WLAN industriales y un servidor OPC (IGS), integrados a un sistema SCADA GE Cimplicity con acceso remoto mediante Proficy WebSpace. La aportación principal del trabajo consiste en mostrar cómo la integración metodológica entre RAMI 4.0 y PDCA puede emplearse para estructurar el diseño, la implementación y la mejora continua de un sistema SCADA en un entorno real de manufactura, manteniendo coherencia entre arquitectura tecnológica, monitoreo en tiempo real y desempeño operativo [6], [22].

En el caso analizado, la solución permitió incrementar el OEE de 83.5 % a 91.2 %, reducir el MTTR de 10–20 min por evento a un intervalo de 5–8 min, y disminuir en 30.8 % el tiempo de carga en la etapa de QC. En conjunto, estos resultados respaldan la pertinencia de integrar la arquitectura RAMI 4.0 y la metodología PDCA como un

marco conjunto para fortalecer la eficiencia operativa, la trazabilidad y las capacidades de transformación digital en entornos de manufactura avanzada [5], [20].

I.I. OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS.

El objetivo general de este estudio fue proponer e implementar un sistema SCADA en una línea de ensamble automotriz japonesa guiada por AGVs, empleando como marco metodológico la arquitectura RAMI 4.0 y el ciclo de mejora continua PDCA, con el propósito de incrementar la OEE a un valor superior al 90 %, asegurando interoperabilidad, trazabilidad y una gestión operativa basada en datos. De manera específica, se planteó:

1. Diseñar una arquitectura alineada con RAMI 4.0 para posicionar los activos, los niveles jerárquicos y las capas funcionales del sistema.
2. Aplicar el ciclo PDCA como metodología estructural de mejora continua para planificar, ejecutar, verificar y ajustar cada iteración del proyecto.
3. Implementar redes alámbricas e inalámbricas para asegurar la comunicación entre 60 AGVs, los PLC Omron y las 7 estaciones de carga, atendiendo los retos de conectividad y latencia del entorno.
4. Integrar los datos operativos en una base de datos central para habilitar la trazabilidad y el análisis histórico de eventos e indicadores.
5. Estandarizar la comunicación mediante OPC (IGS) entre los PLC y el sistema SCADA GE Cimplicity.
6. Reducir el MTTR a menos de 10 min por evento mediante alarmas contextualizadas, análisis de información histórica y estandarización de procedimientos de atención a fallas.
7. Optimizar el proceso de carga de los AGVs en estaciones QC, considerando tiempos de ciclo, porcentaje de carga retenida y patrones de operación.

En conjunto, estos objetivos permitieron alinear la operación del sistema SCADA con la estructura modular de RAMI 4.0, mientras que el ciclo PDCA aseguró que cada intervención estuviera respaldada por un diagnóstico sistemático y por la evaluación comparativa del desempeño del sistema.

II. DESARROLLO DE CONTENIDOS

Esta investigación propone un enfoque estructurado para la implementación de un sistema SCADA en un entorno de manufactura inteligente, empleando la arquitectura RAMI 4.0 y el ciclo PDCA como marcos rectores. De acuerdo con el informe técnico GMA/VDE [2], RAMI 4.0 proporciona una estructura tridimensional que organiza activos funciones

e información a lo largo del ciclo de vida del producto, habilitando una integración estandarizada en entornos industriales avanzados. Esta arquitectura ha sido utilizada en proyectos de digitalización y desarrollo de gemelos digitales, donde su estructura por capas y niveles jerárquicos facilita la interoperabilidad y la modularización de los sistemas industriales [19].

A partir del caso de estudio desarrollado en una línea de ensamble automotriz de origen japonés operada mediante AGVs, se describe la integración tecnológica y el proceso de mejora continua que permitieron habilitar interoperabilidad, trazabilidad y eficiencia operacional. Este tipo de integración es congruente con lo reportado en la literatura sobre arquitecturas distribuidas y estandarizadas en manufactura, donde se destaca que la adopción de modelos basados en RAMI 4.0 incrementa la capacidad de adaptación y escalabilidad en sistemas ciberfísicos [18], [22]. Asimismo, estudios recientes señalan que la alineación entre arquitecturas digitales, modelos de información y procesos de supervisión constituye un habilitador relevante para la operación confiable de líneas automatizadas en entornos industriales complejos [15], [24].

Del mismo modo, la incorporación del ciclo PDCA sobre la arquitectura RAMI 4.0 sigue el enfoque planteado por la literatura sobre PDCA 4.0, donde se destaca que la digitalización potencia los mecanismos clásicos de mejora continua mediante retroalimentación basada en datos, evolucionando hacia un esquema más ágil de diagnóstico y ajuste [3]. En este marco, la integración de sensorización, comunicaciones industriales y sistemas de supervisión permite ejecutar ciclos cortos de planificación, ejecución, verificación y ajuste, incrementando la velocidad y precisión del proceso de mejora continua. Investigaciones recientes sobre PDCA digitalizado señalan que su aplicación en entornos automatizados favorece la estabilidad operativa, la detección temprana de desviaciones y la estandarización de procesos mediante evidencia cuantitativa [17], [21].

Adicionalmente, los resultados del caso se analizan bajo la perspectiva del desempeño global del equipo (OEE), en línea con estudios que evidencian que las tecnologías de Industria 4.0 —incluyendo SCADA, IIoT y analítica de datos— pueden contribuir significativamente a mejorar la disponibilidad, el rendimiento y la calidad en sistemas de manufactura [5]. Asimismo, la literatura señala que la disciplina de datos, el monitoreo inteligente y la integración entre capas operativas y de información son condiciones

relevantes para sostener mejoras de desempeño en sistemas industriales digitalizados [1], [20], [26]. En conjunto, estos marcos orientan las decisiones, estructuran los procesos y respaldan la interpretación del desempeño del sistema estudiado.

A. Aplicación de la arquitectura RAMI 4.0

La arquitectura RAMI 4.0 es un modelo tridimensional diseñado para estructurar los sistemas industriales dentro del paradigma de la Industria 4.0. Proporciona una representación estandarizada que alinea activos físicos, funciones técnicas y procesos de negocio en un marco común. Tal como describe el informe técnico GMA/VDE [2], RAMI 4.0 organiza la complejidad de los entornos productivos mediante tres ejes complementarios: (1) el ciclo de vida del producto y su flujo de valor, (2) la jerarquía de la empresa industrial desde el nivel de campo hasta el nivel empresarial, y (3) las capas funcionales que articulan la interacción entre hardware, software y datos en sistemas ciberfísicos.

En el eje del ciclo de vida, la intervención desarrollada en la línea de ensamble automotriz abarcó desde el diseño de la arquitectura de automatización hasta la operación en planta, contemplando las fases de “tipo” (definición, diseño y configuración del sistema) e “instancia” (ejecución operativa y recopilación de datos en tiempo real). Esta distinción permitió documentar tanto los requisitos estructurales como el comportamiento del sistema bajo condiciones reales.

En el eje de capas funcionales, se abordaron seis de las siete capas del modelo RAMI 4.0:

- Capa de activos: AGVs, estaciones de carga QC, sensores y redes WLAN industriales.
- Capa de integración: mapeo de variables en el servidor OPC IGS.
- Capa de comunicación: protocolo FINS Ethernet y dispositivos WLAN.
- Capa de información: estructuración de variables críticas, como estado de batería, tiempos de ciclo y eventos de falla.
- Capa funcional: pantallas de monitoreo en SCADA Cimplicity / Proficy Webpace, alarmas, tendencias y reportes.
- Capa de negocio: soporte a la toma de decisiones operativas mediante indicadores OEE y MTTR.

Esta implementación aseguró interoperabilidad entre dispositivos heterogéneos y trazabilidad de eventos, estableciendo una base sólida para la futura escalabilidad

del sistema SCADA. La representación estructural de RAMI 4.0 guio el proceso desde la etapa de diseño hasta la validación operativa, tal como lo plantea el informe técnico GMA/VDE [2], donde se destaca que el modelo permite alinear procesos, activos y funciones dentro de entornos industriales complejos. De igual forma, la solución se apoyó en prácticas de integración y supervisión descritas en la literatura reciente sobre automatización industrial [1]. Finalmente, la adopción de OPC como estándar de intercambio de datos siguió lineamientos reportados en trabajos sobre interoperabilidad industrial y modelos de información OPC UA, los cuales resaltan su relevancia para garantizar comunicación segura, interoperable y semánticamente consistente en arquitecturas industriales modernas [4], [24].

En la Fig. 1 se muestra una adaptación del modelo RAMI 4.0 con los elementos utilizados en el caso de estudio.

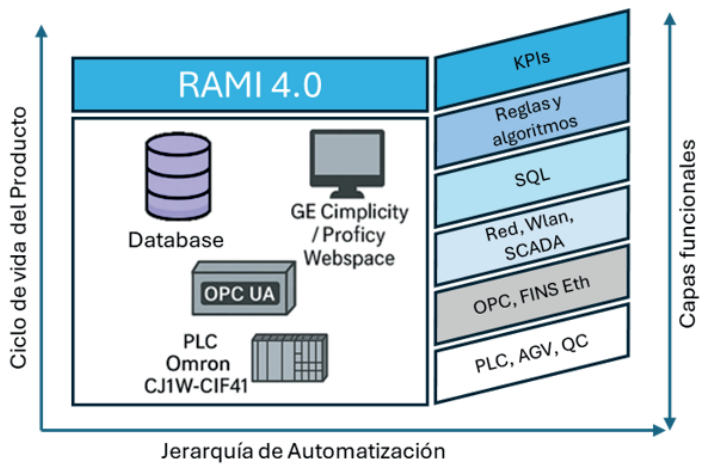


Fig. 1. Adaptación del modelo RAMI 4.0 al sistema SCADA implementado. Asimismo, la Tabla I resume la relación entre las capas RAMI 4.0 abordadas y los componentes tecnológicos implementados en el proyecto.

Tabla I. Relación entre capas RAMI 4.0 y componentes del sistema SCADA.

Capa RAMI 4.0	Componente aplicado
Activos	AGVs, estaciones QC, sensores
Integración	OPC Server (IGS)
Comunicación	WLAN industriales, módulo CJ1W-CIF41
Información	Variables monitoreadas: batería, ciclo, fallas
Funcional	SCADA GE Cimplicity, Proficy Webpace
Negocio	Indicadores OEE, MTTR, decisiones operativas

Esta alineación metodológica no solo facilitó el despliegue técnico del sistema, sino que también fortaleció una visión integral y estructurada de los procesos productivos, en concordancia con los enfoques de digitalización planteados en la Industria 4.0. La adopción del modelo RAMI 4.0 permitió organizar los componentes físicos, lógicos y empresariales dentro de un marco común, tal como se describe en el informe técnico GMA/VDE [2]. En el caso de estudio, esta guía metodológica se materializó en la ubicación del servidor OPC (IGS) dentro de la capa de Integration, actuando como puente entre los PLC Omron y la plataforma SCADA GE Cimplicity, configuración consistente con la literatura sobre interoperabilidad y estructuración de datos industriales [4], [24]. También, la capa Business se vinculó con los indicadores OEE y MTTR, integrando la operación de los AGVs con los objetivos productivos y permitiendo una toma de decisiones alineada con metas estratégicas de disponibilidad, rendimiento y confiabilidad del sistema.

B. Aplicación del ciclo PDCA en la mejora continua

El ciclo PDCA, también conocido como ciclo de Deming, es una metodología iterativa ampliamente utilizada en sistemas de gestión de calidad y mejora continua. Su enfoque se basa en la planificación, ejecución, verificación y ajuste de procesos con el objetivo de mejorar de forma progresiva el rendimiento organizacional. En el contexto de la Industria 4.0, este ciclo ha sido reinterpretado para operar en entornos digitales, integrando tecnologías emergentes, sistemas ciberfísicos y analítica de datos que permiten monitoreo en tiempo real y toma de decisiones más ágiles. La literatura sobre PDCA 4.0 destaca que la digitalización amplifica la capacidad del método para cerrar brechas operativas mediante retroalimentación inmediata basada en datos [3].

De manera complementaria, Martínez et al. [11] muestran que la incorporación de simulación, sensorización avanzada y modelos digitales dentro de las fases del ciclo PDCA permite acelerar la validación de procesos y mejorar la precisión de los ajustes operativos, especialmente en sistemas colaborativos y automatizados. Estas perspectivas consolidan el ciclo PDCA como un mecanismo adaptable y compatible con las arquitecturas de manufactura inteligente.

El ciclo PDCA se adoptó como columna vertebral metodológica para organizar la mejora continua del sistema SCADA en un entorno de Industria 4.0. En esta aproximación, RAMI 4.0 sirvió como mapa de referencia para ubicar activos, funciones y niveles jerárquicos, mientras

que PDCA estructuró iteraciones cortas, medibles y trazables sobre dichos componentes. Esta integración se alinea con los lineamientos técnicos difundidos por Plattform Industrie 4.0, que destacan la importancia de modelos arquitectónicos estandarizados para garantizar interoperabilidad en sistemas complejos [2]. Además, coincide con el enfoque de PDCA digitalizado reportado en la literatura reciente, donde se señala que la retroalimentación basada en datos fortalece la toma de decisiones y la mejora continua en entornos ciberfísicos [3], [17], [22].

Plan (Planificar). Se estableció una línea base del desempeño de los AGVs y de las estaciones de carga, identificando brechas críticas como un MTTR por evento de 10–20 min, incidencias recurrentes por descarga de batería y baja visibilidad operativa respecto al estado de los AGVs y de las estaciones. Con esta caracterización inicial se definieron los KPI prioritarios —OEE, MTTR y tiempo de carga en QC—, así como los criterios de aceptación por iteración. Este enfoque es consistente con lo expuesto por Torres-López et al. [5], quienes destacan que las tecnologías habilitadoras de Industria 4.0 aportan mejoras en la eficiencia global de equipos mediante monitoreo inteligente, conectividad y analítica de datos. De esta manera, coincide con los lineamientos descritos por Silva et al. [1] sobre prácticas de supervisión industrial y sistemas SCADA en entornos de automatización avanzada.

Do (Hacer). Se desplegó la arquitectura del sistema conforme a los lineamientos del modelo RAMI 4.0, habilitando una capa de integración mediante OPC (IGS) para la consolidación de variables, comunicaciones FINS Ethernet y enlaces WLAN industriales para el transporte confiable de datos, así como vistas operativas en GE Cimplicity y Proficy WebSpace, que incluyeron alarmas, tendencias, tableros y reportes de desempeño. Esta fase también contempló la capacitación del personal operativo y la ejecución de pruebas de conectividad con los AGVs y las estaciones de carga, siguiendo las recomendaciones de interoperabilidad establecidas por Plattform Industrie 4.0 [2] y los criterios de arquitectura OPC para entornos industriales avanzados descritos por Almeida et al. [4].

Check (Verificar). Se midieron sistemáticamente los KPI definidos y se comparó el desempeño antes y después de la intervención. El enfoque adoptado es consistente con investigaciones que emplean datos SCADA para modelado, diagnóstico y detección temprana de anomalías, como las de López-Paniagua et al. [6], quienes exploran el uso de

registros históricos para pronóstico operacional, y Zhang et al. [7], quienes demuestran la utilidad del análisis de series temporales para la identificación temprana de fallas en sistemas industriales. Esta fase se alineó además con el enfoque metodológico del artículo, basado en una comparación descriptiva antes–después de los indicadores agregados del sistema.

Act (Actuar). Se ajustaron límites y lógicas de alarmas y HMI, se estandarizaron hojas de operación estándar para la atención de fallas recurrentes y se definieron acciones preventivas para el siguiente ciclo de iteración. Estas actividades reforzaron la trazabilidad, la repetibilidad del proceso y la capacidad de respuesta ante variaciones operativas. Este enfoque es congruente con las propuestas de PDCA digitalizado presentadas por Mourtzis et al. [3], quienes describen cómo la retroalimentación basada en datos y la integración con sistemas ciberfísicos permiten cerrar eficazmente el ciclo de mejora continua en entornos de Industria 4.0.

En conjunto, el anclaje del ciclo PDCA sobre la estructura de RAMI 4.0 permitió una mejora sostenida y reproducible del sistema, al integrar datos operativos de los AGVs y de las estaciones de carga, conectividad estandarizada e inspección continua del desempeño de las baterías. Este enfoque articula los principios de supervisión y automatización para manufactura inteligente descritos en la literatura reciente [1] con la organización sistemática de activos, funciones y capas establecida por Plattform Industrie 4.0 [2]. De esta forma, se alinea con evidencia que documenta cómo las tecnologías habilitadoras de Industria 4.0 —incluyendo SCADA, IIoT y analítica de datos— contribuyen a mejorar el OEE y a fortalecer la toma de decisiones operativas [5].

En la Fig. 2. se ilustra la aplicación del ciclo PDCA dentro del proyecto SCADA.

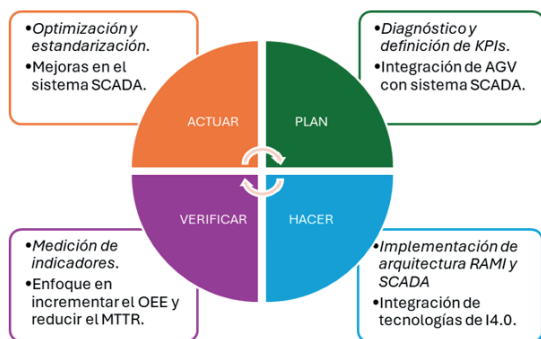


Fig. 2. Aplicación del ciclo PDCA en el proyecto SCADA.

La integración conjunta de RAMI 4.0 y el ciclo PDCA constituyó un enfoque metodológico complementario para la implementación del sistema SCADA en la línea de ensamble automotriz. Mientras RAMI 4.0 proporcionó la estructura arquitectónica para organizar activos, capas funcionales, comunicaciones y niveles jerárquicos, el PDCA permitió que dicha arquitectura evolucionara mediante ciclos iterativos de planificación, ejecución, verificación y ajuste. En la práctica, RAMI 4.0 definió dónde intervenir —sensores, PLCs, capa de integración OPC y nivel de supervisión SCADA—, mientras que PDCA definió cómo ejecutar estas intervenciones de manera sistemática, medible y reproducible.

Esta coexistencia metodológica permitió que el proyecto avanzara con una base técnica sólida y con una lógica de mejora continua soportada en datos operativos reales. Como resultado, el sistema logró integrarse de forma interoperable y trazable, además de generar un mecanismo de optimización alineado con los principios de manufactura inteligente. Este enfoque es congruente con las mejores prácticas reportadas en la literatura para arquitecturas digitales basadas en RAMI 4.0 [2], metodologías de supervisión y automatización en Industria 4.0 [1] y estrategias de mejora continua habilitadas por PDCA 4.0 en entornos ciberfísicos [3].

III. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló como un estudio de caso aplicado en una línea de ensamble automotriz operada mediante AGVs, orientado al diseño, implementación y evaluación de un sistema SCADA bajo el marco combinado de RAMI 4.0 y el ciclo PDCA. Este enfoque es consistente con la literatura reciente sobre adopción de tecnologías digitales en manufactura, donde los casos reales de implementación se consideran una vía válida para analizar el efecto operativo de soluciones de digitalización en entornos industriales complejos [22].

La selección de la línea de estudio respondió a su relevancia operativa dentro del proceso de ensamble automotriz y a la presencia de brechas claramente identificadas antes de la intervención, entre ellas tiempos elevados de restablecimiento por evento, fallas recurrentes por descarga de baterías, baja visibilidad operativa del estado de los AGVs y las estaciones de carga, así como la necesidad de elevar el OEE por encima del 90 %. Estas condiciones la convirtieron en una unidad de análisis adecuada para evaluar el comportamiento del sistema una vez

implementada la solución SCADA.

La metodología aplicada en el desarrollo del sistema SCADA se fundamentó en la integración operativa entre el modelo RAMI 4.0 y el ciclo PDCA, permitiendo establecer una estructura de trabajo clara, sistemática y eficiente para la implementación tecnológica. Esta integración articuló los niveles jerárquicos, el ciclo de vida y las capas funcionales definidas por RAMI 4.0 con un enfoque iterativo de mejora continua propio del PDCA, asegurando que cada avance técnico estuviera respaldado por diagnóstico, validación funcional y retroalimentación continua [2], [3], [12].

Para evaluar el efecto de la implementación del sistema SCADA se adoptó un diseño cuasi-experimental de tipo pretest–posttest de un solo grupo, representado conceptualmente como:

$O1 \rightarrow X \rightarrow O2$

donde O1 corresponde a la medición de los indicadores antes de la intervención, X a la implementación del sistema SCADA bajo el marco RAMI 4.0 y la metodología PDCA, y O2 a la medición posterior a la intervención.

En términos temporales, la implementación oficial del sistema SCADA se realizó al cierre de diciembre de 2023. A partir de ese momento, durante 2024 se desarrolló la etapa de estabilización operativa, trazabilidad de datos y mejora continua, en la que se ajustaron parámetros de supervisión, tiempos de carga, alarmas y criterios de operación con base en la información capturada por el sistema. En consecuencia, la condición pretest (O1) corresponde al comportamiento operativo previo a la entrada formal del SCADA, mientras que la condición posttest (O2) corresponde al desempeño observado durante 2024, una vez habilitada la captura estructurada de datos y ejecutadas las iteraciones de mejora bajo el ciclo PDCA.

Bajo esta lógica, el efecto observado de la implementación puede expresarse conceptualmente mediante el estimador:

$$\tau = O2 - O1$$

y mediante el modelo:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 D + \varepsilon$$

donde Y representa el indicador clave de desempeño evaluado, D es una variable dicotómica de intervención (D = 0 antes y D = 1 después), y β_1 representa el cambio asociado a la implementación. Este modelo se emplea

únicamente como soporte metodológico conceptual para estructurar la comparación antes–después y no con fines inferenciales.

El análisis estadístico se realizó mediante un enfoque descriptivo comparativo antes–después, calculando para cada indicador la diferencia absoluta y la variación porcentual relativa, de acuerdo con las expresiones:

$$\Delta = X_{\text{después}} - X_{\text{antes}}$$

$$\% \text{ cambio} = ((X_{\text{después}} - X_{\text{antes}}) / X_{\text{antes}}) \times 100$$

En el caso de indicadores reportados como rango, como el MTTR, se utilizó el punto medio del intervalo para el análisis comparativo:

$$X = (\text{Límite inferior} + \text{Límite superior}) / 2$$

Dado que la información disponible en el artículo corresponde a valores agregados antes y después, los resultados se interpretan como evidencia cuantitativa comparativa y no como demostración de causalidad estricta.

En este marco, RAMI 4.0 proporcionó la estructura arquitectónica para ubicar activos, flujos de información y capas funcionales dentro del sistema industrial [2], mientras que PDCA operó como la lógica iterativa de intervención para planificar, ejecutar, verificar y ajustar cada fase del proyecto [3]. Esta convergencia metodológica es coherente con trabajos recientes que destacan que la combinación de marcos arquitectónicos estandarizados y ciclos sistemáticos de mejora fortalece la implementación de soluciones digitales en manufactura inteligente [12], [22]. Asimismo, la integración entre dominios IT/OT, elemento central para la digitalización industrial contemporánea, se alinea con revisiones recientes que subrayan la necesidad de arquitecturas interoperables, flexibles y orientadas a datos para garantizar escalabilidad y continuidad operativa [23].

Para ello, se establecieron fases operativas desde el análisis inicial hasta la validación funcional, detalladas de la siguiente manera:

A. Análisis y planeación (Plan).

- Levantamiento de requerimientos de información y operación. Se identificaron necesidades relacionadas con el estado de los AGVs, niveles de carga de baterías, tiempos de ciclo, alarmas operativas y eventos críticos del sistema.

- Mapeo RAMI 4.0. Se clasificaron los activos, niveles jerárquicos y capas funcionales involucradas (Asset, Integration, Communication, Information, Functional y Business), siguiendo la estructura propuesta por el modelo RAMI 4.0 [2].
- Definición de KPI y criterios de aceptación. Los indicadores clave de desempeño seleccionados fueron OEE, MTTR por evento, tiempo de carga en QC y tiempo de paro acumulado, por ser variables directamente relacionadas con disponibilidad, rendimiento y estabilidad operacional [5].
- Plan de datos. Se definieron variables críticas, frecuencia de muestreo y políticas de retención para su almacenamiento histórico y análisis comparativo. Este criterio es consistente con trabajos que destacan que la calidad de los datos SCADA condiciona la utilidad del diagnóstico y la toma de decisiones posterior [6], [7].
- Diagnóstico de conectividad. Se revisaron condiciones de red, cobertura inalámbrica y puntos críticos de comunicación entre AGVs, PLCs y estaciones, en línea con estudios recientes sobre evaluación de sensores IIoT y redes de fábrica en procesos de digitalización [25].

B. Diseño de la arquitectura (Do – diseño).

- Modelo de información y normalización de tags. Se estableció una estructura estandarizada para la nomenclatura de variables, unidades, escalas, estados lógicos y convenciones de alarmas, asegurando coherencia semántica entre PLCs, servidor OPC y plataforma SCADA.
- Capa de integración OPC. El servidor OPC (IGS) se definió como punto central de intercambio de datos entre los PLC Omron, operando con protocolo FINS, y la plataforma SCADA. Esta decisión se apoyó tanto en la literatura clásica de interoperabilidad OPC [4] como en revisiones recientes sobre generación y estructuración de modelos de información OPC UA, que destacan su relevancia para asegurar consistencia semántica, escalabilidad e integración entre sistemas heterogéneos [24]. De manera complementaria, la lógica de adquisición y trazabilidad de datos es congruente con trabajos recientes sobre soluciones distribuidas de captura de información para Industry 4.0 [26].
- Red y comunicación. Se diseñó una arquitectura de red con direccionamiento estructurado, segmentación lógica y enlaces FINS Ethernet/WLAN para el transporte confiable de datos entre AGVs, PLCs y el servidor SCADA. Este enfoque es consistente con literatura reciente sobre integración IT/OT y conectividad industrial orientada a la digitalización [23], así como con estudios sobre evaluación de sensores y redes en fábricas inteligentes [25].

- Capa funcional SCADA. Se desarrollaron interfaces HMI, alarmas, tendencias, reportes operativos e historial de variables mediante GE Cimplicity y Proficy WebSpace, privilegiando la supervisión en tiempo real, la trazabilidad y el soporte a decisiones operativas [1].

C. Integración y desarrollo (Do – implementación).

- Configuración OPC (IGS). Se definieron canales y dispositivos OPC, se configuraron ítems correspondientes a variables críticas del proceso, se establecieron tasas de sondeo acordes a la dinámica de actualización de AGVs y estaciones de carga, y se verificó la calidad de datos mediante estados Good/Bad/Uncertain [4], [24].
- Integración PLC–SCADA. Se efectuaron pruebas de lectura y escritura mediante el protocolo FINS, asegurando coherencia entre los valores reportados por los PLC Omron y las variables interpretadas por el SCADA. Se añadieron mecanismos de vigilancia de comunicación y rutinas de manejo de excepciones ante desconexiones parciales o latencia excesiva.
- Construcción HMI y alarmas. Se diseñaron interfaces para el monitoreo de AGVs, estaciones de carga, rutas operativas y estados de batería, así como tableros de OEE, MTTR y tiempos de carga, tendencias y reportes automáticos.
- Seguridad operativa. Se implementaron perfiles de acceso, bitácoras de auditoría y mecanismos de autorización para comandos críticos, con el propósito de asegurar trazabilidad y control en la operación del sistema.

D. Verificación funcional (Check).

- Pruebas por capas RAMI 4.0. La verificación funcional se realizó mediante pruebas segmentadas por capas, evaluando conectividad, consistencia semántica de variables y estabilidad en los ciclos de comunicación entre AGVs, PLCs y SCADA.
- Validación de KPI. La evaluación del desempeño se llevó a cabo mediante comparación descriptiva antes–después utilizando la información histórica disponible en el sistema. En esta fase no se realizaron análisis inferenciales, sino únicamente la cuantificación del cambio observado en cada KPI, mediante diferencia absoluta y cambio porcentual relativo.
- Ajustes de límites y alarmas. Se redefinieron umbrales, prioridades y temporizadores de alarmas con base en las condiciones observadas durante pruebas de operación continua, buscando mejorar la respuesta ante eventos críticos y reducir notificaciones irrelevantes.

E. Despliegue y operación (Act/estandarización).

- Capacitación. Se capacitó a operadores y personal de mantenimiento, y se elaboraron hojas de operación estándar y guías de respuesta a fallas.
- Estandarización. Se formalizaron modelos de datos, procedimientos operativos y criterios de evaluación para asegurar que las mejoras implementadas pudieran sostenerse y repetirse en futuras iteraciones del sistema [3].
- Cierre del ciclo con negocio. Se implementaron tableros ejecutivos con indicadores de OEE, disponibilidad y desempeño, orientados a apoyar la toma de decisiones.

A lo largo de esta metodología, el uso de RAMI 4.0 permitió ubicar cada componente del sistema SCADA en una capa funcional y en un nivel jerárquico específico, facilitando la planificación arquitectónica y la estandarización del diseño. La Tabla II muestra cómo se aplicaron los ejes jerárquicos del modelo para estructurar la solución tecnológica, mientras que la Tabla III presenta la asignación de las principales variables del sistema dentro de las capas funcionales de RAMI 4.0. En conjunto, esta orientación metodológica permitió alinear la operación del sistema con una estructura modular y trazable, asegurando que cada iteración del ciclo PDCA contribuyera a mejorar la disponibilidad, la confiabilidad operativa y la consistencia de los datos capturados.

Tabla II.
Correspondencia entre jerarquía RAMI 4.0 y elementos del sistema SCADA.

Nivel jerárquico RAMI 4.0	Elementos aplicados
Nivel de campo	Sensores, estaciones de carga, estaciones de trabajo.
Nivel de control	PLC Omron, módulo CJ1W-CIF41, Antenas WLAN.
Nivel de supervisión	OPC Server, alarmas y variables.
Nivel de operación	SCADA Cimplicity, visualización, tendencias.
Nivel de empresa	Reportes, análisis de OEE, decisiones estratégicas.

Tabla III.
Asignación de variables del sistema SCADA a capas funcionales RAMI 4.0

Capa funcional	Variables monitoreadas
Activos	Estados de los AGV, baterías y QC.
Integración	Dirección de comunicación, asignación de IPs.
Comunicación	Calidad de señal WLAN, conectividad FINS/Ethernet.
Información	Tiempos de carga, eventos de falla, tiempos de falla.
Funcional	Revisión de alarmas, lógica de visualización (HMI).
Negocio	KPIs OEE, MTTR, productividad diaria.

En conjunto, esta orientación metodológica permitió alinear la operación del sistema SCADA con una estructura modular y trazable, asegurando que cada iteración del ciclo PDCA contribuyera a mejorar la disponibilidad, la confiabilidad operativa y la consistencia de los datos capturados por el sistema.

IV.RESULTADOS

La puesta en operación oficial del sistema SCADA se realizó al cierre de diciembre de 2023; por ello, los resultados reportados como condición posterior a la intervención corresponden al periodo de operación, ajuste y seguimiento desarrollado durante 2024. Este periodo permitió consolidar la trazabilidad de los datos, refinar parámetros de supervisión y captura, y ejecutar ciclos sucesivos de mejora bajo PDCA, por lo que los cambios observados en los indicadores reflejan el comportamiento del sistema una vez implementada formalmente la solución y estabilizada su operación.

La evaluación del sistema SCADA se realizó mediante un análisis descriptivo comparativo antes–después, bajo un diseño cuasi-experimental pretest–posttest de un solo grupo. En consecuencia, los resultados se presentan como evidencia cuantitativa comparativa del efecto observado tras la implementación, calculando para cada indicador la diferencia absoluta y la variación porcentual relativa, sin aplicar pruebas de inferencia estadística debido a que la información disponible corresponde a valores agregados y no a observaciones individuales.

La implementación del sistema SCADA, estructurada bajo la arquitectura RAMI 4.0 y orientada mediante el ciclo PDCA, generó mejoras consistentes en los indicadores clave de desempeño de la línea de ensamble automotriz operada por AGVs. El análisis comparativo entre el estado inicial y la condición posterior a la intervención muestra una mejora global del desempeño operativo, consistente con el objetivo del proyecto de alcanzar una OEE superior al 90 %. En este sentido, el OEE pasó de 83.5 % a 91.2 %, lo que representa una diferencia absoluta de 7.7 puntos porcentuales y una variación relativa de +9.22 %. La Fig. 3 resume visualmente este cambio

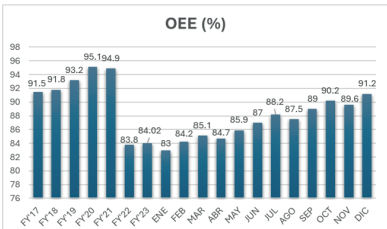


Fig. 3 Comparativo del indicador OEE antes y después de la implementación del SCADA.

En el caso del MTTR, el artículo reporta un rango operacional de 10–20 min por evento antes de la implementación y de 5–8 min después de la intervención. Para fines del análisis comparativo descriptivo se utilizaron los puntos medios de ambos intervalos, es decir, 15.0 min antes y 6.5 min después. Bajo este criterio, la mejora corresponde a una reducción absoluta de 8.5 min y una variación relativa de -56.7 %. Es importante señalar que las Fig. 4 y Fig. 5 muestran la evolución histórica anual y mensual del MTTR, mientras que la comparación resumida de esta sección utiliza el rango operativo reportado en el estudio como referencia de contraste antes–después. De este modo, no existe contradicción entre ambos elementos: las figuras muestran tendencias históricas de comportamiento, mientras que la tabla comparativa resume el cambio observado con fines metodológicos.

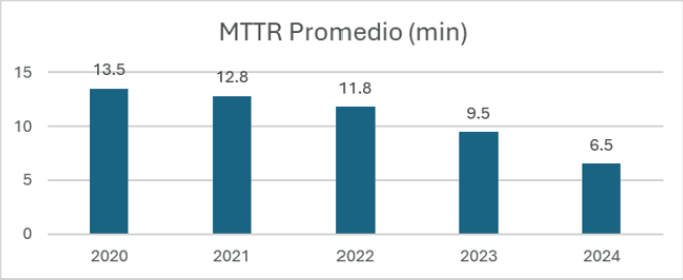


Fig. 4 Evolución Anual del MTTR (2020–2024)

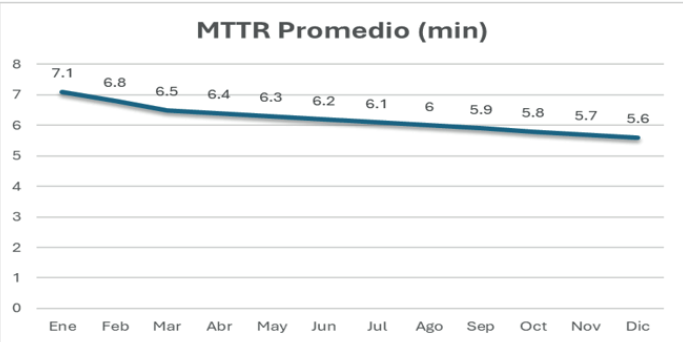


Fig. 5 MTTR Promedio Mensual – Año 2024.

Respecto al tiempo de paro acumulado, el sistema registró una disminución de 180 min a 100 min promedio por semana, lo que equivale a una reducción absoluta de 80 min y una variación relativa de -44.4 %. La Fig. 6 muestra este comportamiento en las semanas analizadas, junto con la relación entre el número de AGVs en operación y la reducción progresiva de los tiempos de paro. A partir del análisis de los registros históricos generados por el SCADA se identificaron AGVs con fallas recurrentes que provocaban paros desproporcionados; con base en esta evidencia, se retiraron temporalmente del circuito operativo para

diagnóstico, lo que contribuyó a estabilizar el flujo de transporte interno y a disminuir el tiempo de paro acumulado.

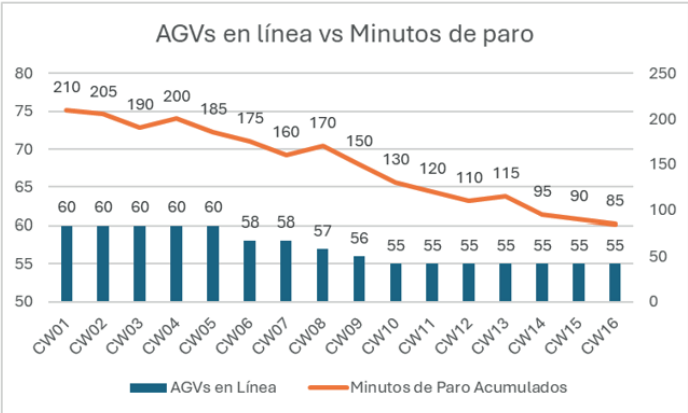


Fig. 6 Comparativo del tiempo de paro acumulado en el periodo analizado.

Con relación al proceso de carga en estaciones QC, se realizó un análisis comparativo entre el tiempo de descarga de las baterías y el tiempo efectivo de carga en estación, con el objetivo de identificar la mejor condición operativa para sostener el tiempo ciclo de la línea y reducir eventos de batería descargada. A partir de este análisis se ajustaron los tiempos de permanencia en estación, logrando reducir el tiempo promedio de carga de 65 s a 45 s, lo que representa una diferencia absoluta de 20 s y una variación relativa de -30.8 %.

La Fig. 7 presenta la relación entre el tiempo de carga en estaciones QC, el porcentaje de carga retenida por los AGVs y la autonomía estimada de operación. A partir del análisis de los registros históricos generados por el sistema SCADA durante

2024 —incluyendo tiempos de conexión en estación, comportamiento de carga y desempeño de las baterías durante el recorrido del circuito— se realizaron ajustes iterativos para determinar el punto operativo más conveniente entre tiempo de carga y autonomía. Inicialmente, los AGVs requerían aproximadamente 65 s para alcanzar un nivel de carga suficiente; sin embargo, tras la optimización del proceso este valor se redujo a 45 s (-30.8 %), manteniendo una retención de carga cercana al 60 %, equivalente a una autonomía aproximada de 7 h por ciclo sin necesidad de recarga. Este equilibrio permitió sostener el tiempo de ciclo de la línea y reducir eventos asociados a batería descargada, sin comprometer la autonomía operativa de los AGVs.

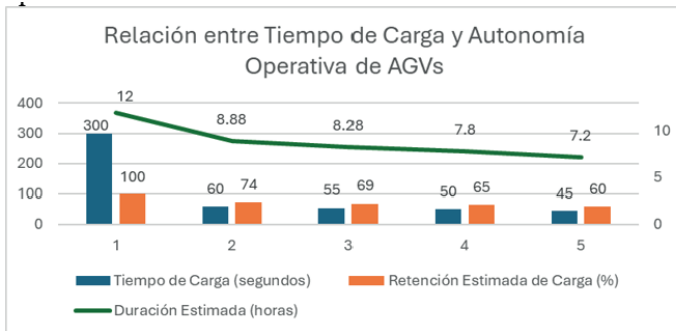


Fig. 7 Relación entre tiempo de carga en estaciones QC, porcentaje de carga retenida y autonomía estimada de operación.

De manera complementaria, el tiempo de ciclo por estación se redujo de 1.34 min a 1.21 min, correspondiente a una diferencia absoluta de -0.13 min y una variación relativa de -9.7% . Esta mejora se interpreta como un efecto operativo consistente con la optimización de la lógica de carga y con la reducción de interrupciones asociadas a eventos de batería.

Adicionalmente, el monitoreo del estado de las baterías y del comportamiento de las estaciones QC mostró una disminución en la frecuencia de fallas por batería descargada, pasando de más de dos eventos diarios a aproximadamente un evento por semana. Aunque este indicador no se incorporó al análisis porcentual principal por no presentarse bajo el mismo formato cuantitativo que los demás KPI, sí constituye evidencia operativa complementaria de la mejora alcanzada en la estabilidad del sistema.

Tabla IV
Comparativo de indicadores clave antes y después del sistema SCADA

Indicador	Antes	Después	Diferencia absoluta	Cambio relativo
OEE	83.50%	91.20%	+7.7 pp	+9.22 %
MTTR promedio por evento*	15.0 min	6.5 min	-8.5 min	-56.7 %
Tiempo de paro acumulado diario	180 min	100 min	-80 min	-44.4 %
Tiempo de carga en estaciones QC	65 s	45 s	-20 s	-30.8 %
Tiempo de ciclo por estación	1.34 min	1.21 min	-0.13 min	-9.7 %

* Para MTTR se utilizó el punto medio de los rangos reportados antes (10–20 min) y después (5–8 min), únicamente con fines de comparación descriptiva.

La Tabla IV sintetiza los principales indicadores evaluados antes y después de la implementación del sistema SCADA, incluyendo el OEE, el MTTR promedio por evento, el tiempo de paro acumulado diario, el tiempo de carga en estaciones QC y el tiempo de ciclo por estación. En ella se observa de forma integrada la magnitud del cambio alcanzado, expresado mediante la diferencia absoluta y el cambio relativo de cada KPI, lo que permite resumir cuantitativamente el efecto observado de la intervención bajo el enfoque descriptivo comparativo adoptado en este estudio.

En conjunto, los resultados muestran que la implementación del sistema SCADA se asoció con mejoras sostenidas en disponibilidad, tiempos de respuesta, eficiencia de carga y desempeño global del proceso. Bajo el alcance metodológico del estudio, estas mejoras deben interpretarse como evidencia cuantitativa comparativa del efecto observado tras la intervención, y no como demostración de causalidad estadística estricta.

La Tabla V muestra la relación directa entre los objetivos específicos del proyecto y los resultados obtenidos. En ella se observa que no solo se alcanzaron mejoras en indicadores operativos, como el OEE, MTTR, tiempo de carga y tiempo de paro, sino que también se cumplieron objetivos técnicos clave, como la implementación de la red de comunicación, la integración del SCADA con PLC y OPC, el almacenamiento centralizado de datos y la estandarización de la solución dentro de la planta. En conjunto, la tabla evidencia que el proyecto generó resultados tecnológicos y operacionales alineados con los objetivos planteados.

Tabla V
Síntesis del cumplimiento de objetivos.

Objetivo específico	Resultado principal
Implementar la red de comunicación	Integración de 60 AGVs al SCADA mediante FINS Ethernet/WLAN; de ellos, 55 operaron de forma estable en línea durante la etapa de validación
Obtener y almacenar información operacional	Base de datos central con historización de alarmas, eventos, tiempos de carga y estados operativos
Integrar la información mediante SCADA y OPC	Implementación de IGS, HMI, alarmas, tendencias y monitoreo en tiempo real
Reducir el MTTR por evento	Disminución de 10–20 min/evento a 5–8 min/evento
Mejorar el desempeño operativo	OEE de 83.5 % a 91.2 %; tiempo QC de 65 s a 45 s; paro acumulado de 180 a 100 min/día
Estandarizar la solución en planta	Compatibilidad con la arquitectura SCADA ya utilizada en líneas automáticas

V. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio muestran una evidencia cuantitativa comparativa antes–después consistente con una mejora operativa de la línea de ensamble tras la implementación del sistema SCADA. En particular, el incremento del OEE, la reducción del MTTR, la disminución del tiempo de paro acumulado y la optimización del proceso de carga en estaciones QC sugieren que la intervención se asoció con un mejor desempeño del sistema. No obstante, dado que el análisis se realizó con indicadores agregados, sin tamaño de muestra, sin medidas de dispersión y sin observaciones individuales, estos hallazgos deben interpretarse como evidencia asociativa y no como una demostración de causalidad estadística estricta.

Desde el punto de vista arquitectónico, la adopción de RAMI 4.0 permitió estructurar los activos, las funciones y los niveles jerárquicos del sistema en un modelo uniforme, estandarizando puntos de integración y favoreciendo la interoperabilidad entre los distintos componentes de control, comunicación y supervisión [2]. Esta organización facilitó la alineación entre los AGVs, los PLC Omron, el servidor OPC (IGS) y el sistema SCADA GE Cimplicity / Proficy WebSpace, reforzando la trazabilidad de la información y la consistencia del flujo de datos a lo largo del proceso [4].

Sobre esta base estructural, la incorporación del ciclo PDCA permitió ejecutar iteraciones sucesivas de planificación, implementación, verificación y ajuste, con una lógica de mejora continua apoyada en datos históricos y monitoreo en tiempo real [3]. En este sentido, la integración metodológica entre RAMI 4.0 y PDCA no solo aportó orden al despliegue técnico de la solución, sino que también permitió que la arquitectura evolucionara progresivamente a partir de la retroalimentación operativa del sistema.

En términos de desempeño, el aumento del OEE de 83.5 % a 91.2 % y la reducción del MTTR desde un rango de 10–20 min hasta 5–8 min por evento muestran un comportamiento consistente con una mejora en disponibilidad y capacidad de respuesta. De forma complementaria, la disminución del tiempo de paro acumulado y la reducción del tiempo de carga en estaciones QC reflejan una mejor coordinación entre supervisión, operación y mantenimiento. En particular, el análisis comparativo entre el tiempo de descarga y el tiempo efectivo de carga permitió ajustar la lógica de permanencia de los AGVs en QC, sosteniendo el tiempo de ciclo de la línea y reduciendo eventos asociados a batería descargada.

Estos hallazgos son coherentes con la literatura que vincula la incorporación de tecnologías de Industria 4.0, tales como SCADA, IIoT, interoperabilidad mediante OPC y analítica de datos, con mejoras en el desempeño operativo y en la visibilidad de los procesos industriales [1], [5], [18]. De igual manera, los estudios orientados a PDCA 4.0 señalan que la digitalización de los ciclos de mejora continua incrementa la capacidad de diagnóstico, la velocidad de ajuste y la trazabilidad de las decisiones operativas [3], [17]. En este trabajo, esa convergencia entre arquitectura estandarizada y mejora iterativa resultó consistente con la evolución observada en los indicadores clave del sistema. Asimismo, la literatura reciente sobre adopción de tecnologías digitales en casos reales de manufactura y sobre integración IT/OT respalda la importancia de evaluar este tipo de soluciones en contextos industriales aplicados y no solo en desarrollos conceptuales [22], [23].

Otro aspecto relevante del caso fue que la mejora observada no se limitó a los indicadores operativos, sino que también incluyó objetivos técnicos del proyecto, tales como la implementación de la red de comunicación, la integración de la información en una base de datos central, la estandarización del intercambio de datos mediante OPC y la compatibilidad de la solución con la arquitectura SCADA ya utilizada en otras áreas de la planta. En este sentido, los resultados obtenidos pueden interpretarse no solo como una mejora de desempeño, sino también como una evidencia de madurez en la integración tecnológica del sistema.

Sin embargo, el alcance del estudio presenta limitaciones. La evaluación se construyó con información agregada antes y después de la intervención, por lo que no fue posible aplicar pruebas de inferencia estadística ni estimar significancia, intervalos de confianza o error estándar. Asimismo, parte de la mejora observada durante 2024 estuvo asociada no solo a la puesta en operación oficial del SCADA al cierre de diciembre de 2023, sino también al proceso posterior de estabilización, ajuste y apropiación operativa del sistema. Por ello, los resultados deben entenderse como evidencia comparativa del efecto observado dentro de un caso aplicado y no como un resultado universalmente generalizable.

En conjunto, la discusión sugiere que la integración de RAMI 4.0 y PDCA constituye un enfoque metodológico adecuado para estructurar e implementar soluciones SCADA en entornos de manufactura inteligente, particularmente cuando se busca mejorar visibilidad operativa, trazabilidad y

desempeño global en líneas de ensamble soportadas por AGVs. Este comportamiento también es consistente con trabajos recientes que analizan la digitalización escalable de sistemas productivos y la evolución de arquitecturas industriales sobre infraestructura existente [27].

VI. CONCLUSIONES

1. La integración de RAMI 4.0 y PDCA proporcionó un marco metodológico claro para diseñar, implementar y estabilizar el sistema SCADA en la línea guiada por AGVs, permitiendo alcanzar una OEE superior al 90 % en el periodo evaluado.
2. RAMI 4.0 permitió ordenar la arquitectura por capas y niveles, facilitando la interoperabilidad entre PLC Omron (FINS), OPC (IGS) y GE Cimplicity / Proficy WebSpace.
3. El ciclo PDCA estructuró iteraciones de mejora orientadas al monitoreo, ajuste y verificación del sistema, favoreciendo decisiones operativas apoyadas en datos históricos y en la supervisión en tiempo real.
4. La optimización del proceso de carga en estaciones QC redujo el tiempo promedio de carga de 65 s a 45 s (-30.8 %), permitiendo sostener el tiempo de ciclo de la línea y disminuir eventos de batería descargada.
5. La disponibilidad operativa mejoró al reducir el MTTR de un rango de 10–20 min a 5–8 min por evento, en concordancia con la mayor visibilidad del sistema y con la estandarización de la atención a fallas.
6. La integración mediante OPC favoreció la estandarización del intercambio de datos y simplificó la conexión entre la capa de control y la capa de supervisión.
7. La historización de alarmas, eventos, estados operativos y tiempos de carga permitió comparar el comportamiento del sistema antes y después de la implementación, aportando evidencia cuantitativa comparativa sobre el desempeño alcanzado.
8. Los resultados obtenidos sugieren que el enfoque propuesto puede contribuir a fortalecer prácticas de mejora continua digital en entornos de manufactura inteligente.
9. El caso analizado muestra que la metodología podría aplicarse en otras líneas de ensamble con condiciones tecnológicas similares, siempre que se mantengan criterios de normalización de información, trazabilidad de datos y seguimiento de KPI.
10. Como proyección de desarrollo, la base arquitectónica implementada admite extensiones hacia analítica predictiva, integración con sistemas MES/ERP y refuerzo de ciberseguridad por capas.

A. Oportunidad de investigaciones futuras.

A partir de los resultados obtenidos, se identifican diversas líneas de trabajo que podrían ampliar el alcance del sistema implementado y fortalecer su evolución dentro de un entorno de manufactura inteligente:

1. Pronóstico de carga y descarga de baterías mediante aprendizaje automático. El uso de modelos predictivos permitiría estimar con mayor precisión el estado futuro de la batería, optimizar estrategias de carga de oportunidad y reducir eventos de batería descargada.
2. Mantenimiento predictivo para AGVs y estaciones QC. El análisis de tendencias históricas, secuencias de alarmas, tiempos de ciclo y variables eléctricas podría utilizarse para anticipar fallas antes de que afecten la disponibilidad del sistema.
3. Migración de AGVs a plataformas AMR. La evolución hacia robots móviles autónomos permitiría evaluar la escalabilidad del marco propuesto en escenarios con mayor autonomía de navegación, percepción del entorno y coordinación de rutas.
4. Desarrollo de un gemelo digital alineado con RAMI 4.0. La construcción de un modelo digital de la línea y de la flota permitiría simular políticas de carga, redistribución de rutas y cambios de layout sin afectar la operación real.
5. Analítica de causa raíz y PDCA cerrado apoyado por datos. La correlación entre desviaciones de KPI y causas probables podría fortalecer la identificación de acciones correctivas y preventivas en ciclos futuros de mejora.
6. Integración con plataformas de analítica operacional. El uso de herramientas de visualización y análisis avanzado permitiría ampliar la explotación de KPI, automatizar reportes y fortalecer la capa de negocio del modelo RAMI 4.0.
7. Escalabilidad multi-línea y multi-sitio. Replicar la arquitectura en otras líneas con diferentes combinaciones de PLC, AGVs y topologías de red permitiría evaluar su portabilidad y estabilidad en distintos contextos industriales.

AGRADECIMIENTOS

A los operadores y líderes de la línea de manufactura, por su participación en las validaciones y el apoyo durante la puesta en marcha.

Al equipo de mantenimiento predictivo y al equipo de mantenimiento AGV, por su colaboración en la integración de PLC Omron, comunicaciones FINS/WLAN y el servidor OPC (IGS), así como en las pruebas funcionales del sistema SCADA.

A la coordinación de posgrado y a los asesores académicos, por la guía metodológica en la alineación RAMI 4.0 – PDCA. A la Subdirección de ingeniería de planta, por el acompañamiento y las facilidades otorgadas para el desarrollo del proyecto.

A la empresa de manufactura automotriz japonesa, por permitir el levantamiento de información en planta y la ejecución de pruebas en la línea de ensamble.

Que esta dedicatoria sirva como un modesto homenaje al legado académico y como un testimonio de profundo respeto y admiración por las contribuciones.

REFERENCIAS

- [1] F. J. Folgado, D. Calderón, I. González, and A. J. Calderón, "Review of Industry 4.0 from the Perspective of Automation and Supervision Systems: Definitions, Architectures and Recent Trends," *Electronics*, vol. 13, no. 4, art. 782, 2024, doi: 10.3390/electronics13040782.
- [2] Plattform Industrie 4.0, Status Report: Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0), VDI/VDE-GMA and ZVEI, Jul. 2015.
- [3] P. Peças, J. Encarnação, M. Gambôa, M. Sampayo, and D. Jorge, "PDCA 4.0: A New Conceptual Approach for Continuous Improvement in the Industry 4.0 Paradigm," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 16, art. 7671, 2021, doi: 10.3390/app11167671.
- [4] I. González, A. J. Calderón, J. Figueiredo, and J. M. C. Sousa, "A Literature Survey on Open Platform Communications (OPC) Applied to Advanced Industrial Environments," *Electronics*, vol. 8, no. 5, art. 510, 2019, doi: 10.3390/electronics8050510.
- [5] E. Masmoudi, L. Piétrac, and S. Durieux, "A Literature Review on the Contribution of Industry 4.0 Technologies in OEE Improvement," in *Decision Support Systems XIII: Decision Support Systems in an Uncertain World: The Contribution of Digital Twins*, S. Liu, P. Zaraté, D. Kamissoko, I. Linden, and J. Papathanasiou, Eds. Cham: Springer, 2023, pp. 69–79.
- [6] U. Singh and M. Rizwan, "SCADA system dataset exploration and machine learning based forecast for wind turbines," *Results in Engineering*, vol. 16, art. 100640, 2022, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100640.
- [7] P. Bangalore and M. Patriksson, "Analysis of SCADA data for early fault detection, with application to the maintenance management of wind turbines," *Renewable Energy*, vol. 115, pp. 521–532, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.08.073.
- [11] M. Raza, A. A. Malik, and A. Bilberg, "PDCA integrated simulations enable effective deployment of collaborative robots: case of a manufacturing SME," *Procedia CIRP*, vol. 104, pp. 1518–1522, 2021, doi: 10.1016/j.procir.2021.11.256.
- [12] R. Schmitt, C. Borck, M. Behm, and J. Böhnke, "Approach of an asset combination based on RAMI4.0 for the digital transformation and operation of a digital twin," *Procedia CIRP*, vol. 130, pp. 724–729, 2024, doi: 10.1016/j.procir.2024.10.155.
- [15] A. Azizi and R. V. Barenji, Eds., *Industry 4.0: Technologies, Applications, and Challenges*. Singapore: Springer, 2023.
- [16] H. Gholami, G. Abdul-Nour, S. Sharif, and D. Streimikiene, Eds., *Sustainable Manufacturing in Industry 4.0: Pathways and Practices*. Singapore: Springer, 2023.
- [17] A. Chakrabarti, S. Suwas, and M. Arora, Eds., *Industry 4.0 and Advanced Manufacturing: Proceedings of I-4AM 2022*. Singapore: Springer, 2023.
- [18] B. S. Chohan, X. Xu, and Y. Lu, "MES Dynamic interoperability for SMEs in the Factory of the Future perspective," *Procedia CIRP*, vol. 107, pp. 1329–1335, 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.05.153.
- [19] T. A. Abdel-Aty, E. Negri, and S. Galparoli, "Asset Administration Shell in Manufacturing: Applications and Relationship with Digital Twin," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 10, pp. 2533–2538, 2022, doi: 10.1016/j.ifacol.2022.10.090.
- [20] A. Mofolasayo, S. Young, P. Martinez, and R. Ahmad, "How to adapt lean practices in SMEs to support Industry 4.0 in manufacturing," *Procedia Computer Science*, vol. 200, pp. 934–943, 2022, doi: 10.1016/j.procs.2022.01.291.
- [21] K. S. Kiangala and Z. Wang, "An Industry 4.0 approach to develop auto parameter configuration of a bottling process in a small to medium scale industry using PLC and SCADA," *Procedia Manufacturing*, vol. 35, pp. 725–730, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.015.
- [22] L. Maretto, M. Faccio, and D. Battini, "The adoption of digital technologies in the manufacturing world and their evaluation: A systematic review of real-life case studies and

future research agenda,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 68, pp. 576–600, 2023, doi: 10.1016/j.jmsy.2023.05.009.

[23] R. Venanzi, G. Di Modica, L. Foschini, and P. Bellavista, “Towards IT/OT integration in industry digitalization: A comprehensive survey,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 245, art. 104373, 2026, doi: 10.1016/j.jnca.2025.104373.

[24] A. Busboom, “Automated generation of OPC UA information models—A review and outlook,” *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 39, art. 100602, 2024, doi: 10.1016/j.jii.2024.100602.

[25] S. N. Anbalagan, M. Schwarz, R. Bemthuis, and P. Havinga, “Assessing Factory’s Industry 4.0 Readiness: A Practical Method for IIoT Sensor and Network Analysis,” *Procedia Computer Science*, vol. 232, pp. 2730–2739, 2024, doi: 10.1016/j.procs.2024.02.090.



Jaime David Vargas Franco es Ingeniero de Procesos con especialidad en automatización. Es Ingeniero en Sistemas Computacionales egresado del Instituto Tecnológico de Orizaba y cursa la Maestría en Manufactura Avanzada en CIATEQ, Aguascalientes. Su trabajo de posgrado se centra en el

desarrollo de un sistema SCADA aplicado a líneas de ensamble con AGVs para elevar la disponibilidad y visibilidad operativa. Ha liderado proyectos de automatización y control, integrando PLCs, robótica y sistemas de visión. Sus iniciativas han contribuido al incremento del OEE en los AGVs mediante monitoreo en tiempo real y estandarización de procesos. Sus intereses abarcan automatización, Industria 4.0 y manufactura aditiva, con un enfoque claro en la optimización basada en datos y la transferencia de conocimiento técnico a planta.



José Alejandro García Arredondo cursó estudios de Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de Querétaro, además de una Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en el Instituto Tecnológico de Aguascalientes. Cuenta con una experiencia muy amplia en desarrollo tecnológico en la

especialidad de control y automatización en proyectos mecatrónicos dentro de CIATEQ dirigidos al sector automotriz, electrónica, textil y metal mecánica. Cuenta con una amplia experiencia en el modelado de eventos dinámicos discretos y la implementación de tecnologías de movimiento servo-controlado, visión artificial, controladores lógicos programables y sistemas de adquisición de datos.

Aleaciones de Magnesio Biodegradables Como Alternativas en Implantes Ortopédicos Temporales

Paulina Delfina Caballero Barrera¹

Daniela Benítez Proa¹

Hanna Paola Florencio Ávila¹

Ivonne Kado-Mercado Elías¹

Verónica Elvira Salazar Muñoz¹ veronica.salazar@uaslp.mx

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Abstract

In the treatment of bone fractures, temporary implants are used to fix the fractured bones during the healing process, thereby providing support throughout the bone regeneration process. This project aimed to evaluate and propose the use of biodegradable magnesium alloys as an alternative for temporary implants, comparing them against traditionally used materials: Ti-6Al-4V ELI alloys, 316 LVM stainless steel, and Co-28.5Cr-6Mo alloy. A bibliographic review was conducted to compare the mechanical properties, corrosion behavior, biocompatibility, costs, and environmental impact of these alloys. Traditional alloys offer greater corrosion resistance and better overall mechanical properties but release potentially toxic ions into the body. Magnesium alloys possess mechanical properties much closer to those of human bone, and their use eliminates the need for a second surgery for removal, as they degrade within the human body, generating bioabsorbable products whose excess can be excreted by the kidneys. Furthermore, they promote bone growth in a process of osteosynthesis and present an advantage in terms of sustainability and costs. Despite the challenge in synchronizing bone healing with their corrosion rate, their clinical applications are already a reality.

Keywords: temporary implants, biocompatibility properties, biodegradable magnesium alloys.

Resumen

En el tratamiento de fracturas óseas, los implantes temporales se usan para fijar la fractura de huesos durante el proceso de curación, de esta manera dan soporte durante el proceso de regeneración ósea. Este proyecto tuvo como objetivo evaluar y proponer el uso de las aleaciones de magnesio biodegradables como alternativa en el uso de implantes temporales, comparándolas frente a materiales tradicionalmente utilizados, los cuales son las aleaciones de Ti-6AL-4V ELI, el acero inoxidable 316 LVM y la aleación Co-28.5Cr-6Mo. Se realizó una revisión bibliográfica para la comparación de las propiedades mecánicas, corrosión, biocompatibilidad, costos e impacto ambiental de las aleaciones. Las aleaciones tradicionales ofrecen mayor resistencia a la corrosión y mejores propiedades mecánicas en general, pero liberan iones potencialmente tóxicos en el cuerpo. Las aleaciones de magnesio poseen propiedades mecánicas mucho más cercanas a las del hueso, su uso elimina la necesidad de una segunda cirugía para su remoción, ya que se degradan en el cuerpo humano,

generando productos bioabsorbibles, y el exceso puede ser excretado por los riñones, favorece además el crecimiento del hueso en un proceso de osteosíntesis, presentan una ventaja en términos de sostenibilidad y costos. A pesar de su desafío en la sincronización de la curación ósea con su velocidad de corrosión, sus aplicaciones clínicas ya son una realidad.

Palabras claves: implantes temporales, propiedades de biocompatibilidad térmicas, aleaciones de magnesio biodegradables.

Introducción.

Un biomaterial puede definirse como cualquier material utilizado para fabricar dispositivos que reemplacen una parte o una función del cuerpo de manera segura, confiable, económica y fisiológicamente aceptable. (Park & Lakes, 2007)

Uno de los campos de investigación en biomateriales es el uso de implantes en el tratamiento de fracturas óseas, que pueden tratarse de forma conservadora fijándolas mediante medios externos como una escayola o tratamiento quirúrgico que implican el uso de dispositivos de fijación.

Un estudio del Instituto Mexicano del Seguro Social entre 2007 y 2019 identificó casos de fractura en niños y adolescentes de 0 a 19 años, registrando un total de 1,400,443 de fracturas, (Clark et al., 2022) lo que equivale a un promedio de 116,704 fracturas por año. Mientras que un estudio centrado en personas mayores de 50 años que sufrieron una fractura relacionada con osteoporosis en 2023 estimó un total de 229,239 fracturas por fragilidad, (Rivera et al., 2024), esta comparación muestra que las fracturas en adultos mayores de 50 años son casi el doble de frecuentes que las registradas anualmente en población infantil y adolescente.

La osteosíntesis es una cirugía de unión de huesos rotos, en la que se coloca el implante ortopédico que da estabilidad mecánica para mejorar el proceso de cicatrización, aunque resulta tentador duplicar los tejidos naturales, esto no ha sido posible, ya que los tejidos naturales tienen una ventaja fundamental sobre los implantes artificiales: su capacidad de adaptarse a nuevas circunstancias remodelando su micro y macroestructura en respuesta a las condiciones, además presentan fatiga mecánica mínima. (Park & Lakes, 2007).

Los implantes ortopédicos incluyen dispositivos temporales de fijación de fracturas, componentes como placas, tornillos, clavos intramedulares, alambres, dispositivos de

Debido a sus buenas propiedades mecánicas, las aleaciones metálicas se utilizan ampliamente en prótesis articulares de carga y dispositivos para fijar fracturas óseas, los principales materiales usados para implantes biomédicos son: la aleación Ti-6Al-4V ELI, el acero inoxidable 316 LVM y la aleación cobalto-cromo- molibdeno Co-28.5Cr-6Mo.

A pesar de que los implantes pueden clasificarse como permanentes o temporales, dependiendo del tiempo que se espera que permanezcan en el cuerpo, en ocasiones, un implante temporal se convierte en permanente si no se retira, o un implante permanente puede necesitar ser extraído por complicaciones. Las indicaciones para la extracción del material de osteosíntesis no están bien definidas en la literatura actual, en una encuesta realizada a cirujanos ortopédicos españoles, el 56% retira el implante a petición del paciente; el 31% siempre lo retira en niños; el 28% lo hace en pacientes asintomáticos para evitar posibles problemas quirúrgicos; el 14% para evitar una posible fractura periimplante; y el 9% por simple preferencia. (Mingo-Robinet y Pérez Aguilar 2021)

El porcentaje de remoción de implantes temporales es sumamente variable. En un estudio realizado en Nepal, en el Hospital Universitario de Katmandú, Shrestha et al. (2013) reportaron que el 26.31% de los implantes de fijación fueron removidos. En contraste, Böstman et al. en Finlandia informaron una tasa de retiro del 81%. Las causas de remoción descritas por Shrestha et al. (2013) fueron: dolor en 45.4%, recomendación médica en 21.3%, deseo del paciente en 19.4%, irritación de tejidos en 11.7% y presencia de infección en 1.46%.

Ha surgido la necesidad de materiales degradables in vivo en este tipo de aplicaciones temporales, para evitar una segunda operación para la remoción de este soporte o bien evitar complicaciones que pueden surgir al no retirar el implante.

Las aleaciones de magnesio se convierten en un excelente candidato, gracias a sus propiedades similares a las del hueso, su biocompatibilidad y la capacidad de degradarse naturalmente en el cuerpo en iones de magnesio que pueden metabolizarse y el exceso excretarse.

Desde el punto de vista clínico, las aleaciones de magnesio representan una alternativa prometedora para implantes temporales de fijación ósea, particularmente en fracturas donde el soporte mecánico es requerido únicamente durante el proceso de consolidación. Su capacidad de degradarse gradualmente en el organismo elimina la necesidad de una segunda intervención quirúrgica para retirar el implante,

reduciendo el riesgo de complicaciones, los costos hospitalarios y el tiempo de recuperación del paciente. Además, algunos dispositivos basados en aleaciones de magnesio ya cuentan con aprobación para uso clínico en aplicaciones ortopédicas específicas, lo que demuestra la viabilidad de esta tecnología en la práctica médica.

El presente trabajo corresponde a una revisión bibliográfica narrativa con enfoque comparativo, cuyo objetivo es proponer el uso de aleaciones de magnesio biodegradables en implantes ortopédicos temporales mediante el análisis y contraste de la información reportada en la literatura científica sobre su desempeño frente a los materiales metálicos tradicionalmente utilizados, como las aleaciones Ti-6Al-4V ELI, el acero inoxidable 316LVM y la aleación Co-28.5Cr-6Mo. La comparación se realizó considerando sus propiedades mecánicas, comportamiento a la corrosión, biocompatibilidad, impacto ambiental y costos.

Objetivo general y específicos.

El objetivo de este trabajo es proponer el uso de aleaciones de magnesio biodegradables en implantes ortopédicos temporales mediante la comparación de su desempeño con materiales convencionales, considerando propiedades mecánicas, de corrosión, biocompatibilidad, impacto ambiental y costos. Este trabajo también está enfocado en atender los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU): 3. Salud y bienestar, 9. Industria, innovación e infraestructura, y 12. Producción y consumo responsable.

Estableciendo como objetivos específicos:

- Evaluar el comportamiento a la corrosión de las aleaciones de magnesio en relación con los materiales convencionales.
- Comparar la biocompatibilidad de las aleaciones de magnesio con la de los materiales actualmente utilizados en implantes ortopédicos.
- Analizar el impacto ambiental asociado al uso de cada uno de los materiales considerados.
- Evaluar los costos de producción y aplicación de las aleaciones de magnesio frente a los materiales tradicionales.

Planteamiento y Desarrollo

El presente trabajo se desarrolló mediante revisión bibliográfica de artículos, libros y textos científicos de buscadores académicos como Scielo, Elsevier y Google Académico. Toda la información obtenida de referencias bibliográficas cuenta con su cita correspondiente, colocada inmediatamente después del texto al que hace referencia.

Se realizó una selección de artículos de acuerdo con su relevancia para la investigación sobre las aleaciones metálicas usadas en implantes, Ti-6Al-4V ELI, acero inoxidable 316 LVM, Co-28.5Cr-6Mo y aleaciones de magnesio biomédicas.

De los artículos disponibles se extrajo la información necesaria de acuerdo con la delimitación de nuestra investigación, para después establecer una comparación de los datos obtenidos para cada aleación.

Se seleccionaron aquellas publicaciones cuya temática estuviera relacionada con las aleaciones metálicas empleadas en implantes ortopédicos temporales, incluyendo Ti-6Al-4V ELI, acero inoxidable 316LVM, Co-28.5Cr-6Mo y aleaciones de magnesio biodegradables. Se priorizaron publicaciones recientes, así como trabajos de referencia ampliamente utilizados en el área. Asimismo, se consideraron únicamente aquellas fuentes que proporcionaban información relevante para la comparación de las propiedades mecánicas, comportamiento frente a la corrosión, biocompatibilidad, costos e impacto ambiental de los materiales estudiados.

La información recopilada de las fuentes bibliográficas fue organizada de acuerdo con las propiedades evaluadas. Posteriormente, los datos se representaron mediante gráficas comparativas, las cuales permitieron analizar las diferencias entre las aleaciones.

Resultados

Los implantes ortopédicos deben funcionar bajo diferentes condiciones de trabajo dentro del cuerpo humano, para la selección y uso de materiales biomédicos, debemos conocer sus propiedades principalmente, su biocompatibilidad, resistencia a la corrosión, propiedades mecánicas, y por supuesto el costo, que también puede ser una limitante en su aplicación.

Un problema importante en la curación de las fracturas óseas es el debilitamiento del hueso debido al fenómeno de stress shielding, que puede resultar en la re-fractura del hueso después de la extracción del aparato de fijación, el hueso al estar sometido a esfuerzos mecánicos puede adaptar su estructura interna en función de la intensidad de las cargas aplicadas incrementando o disminuyendo su volumen según la ley de Wolff, la reducción de carga sobre el hueso induce pérdida de masa ósea, por ello es preferible el uso de materiales con propiedades mecánicas similares al hueso, en especial el módulo elástico. (Jin & Chu. 2017). En la Tabla 1, se muestran el módulo elástico, límite elástico

y densidad de las aleaciones en estudio, comparadas con la del hueso, destacando en similitud las propiedades de la aleación de magnesio.

Un material biocompatible altera lo menos posible la función normal del cuerpo. Algunos de los factores que influyen en la biocompatibilidad de un implante son el tamaño, forma, composición, humectabilidad de la superficie, la rugosidad superficial y la carga. En la práctica, ningún material sintético es completamente compatible con el entorno biológico; cuando recién se coloca un implante, el cuerpo genera una reacción normal a cuerpo extraño (FBR), porque reconoce al implante como algo que no forma parte del organismo. (Eliaz, 2019)

Uno de los problemas que surge de la liberación de productos de corrosión, son los efectos sistémicos y remotos, incluso una corrosión leve puede producir síntomas que van desde una sensibilidad local en el sitio de la zona corroída hasta dolor agudo, enrojecimiento e hinchazón de toda el área alrededor del dispositivo. (Eliaz, 2019).

La reacción sistémica a los implantes metálicos proviene del flujo de iones metálicos liberados por la corrosión. Hay dos posibles vías de toxicidad para los iones metálicos, un ion activo reaccionará inmediatamente con moléculas de agua o aniones inorgánicos, lo que indica que la posibilidad de que se combine con biomoléculas es baja, resultando en una baja toxicidad, sin embargo, esto no significa que la reacción de los iones con biomoléculas no ocurrirá en absoluto, por otro lado, los iones inactivos, no se combinan de inmediato con las moléculas de agua y los aniones inorgánicos, y permanecen en estado iónico durante un tiempo relativamente largo. Por lo tanto, estos iones tienen una mayor probabilidad de combinarse con biomoléculas y mostrar toxicidad. (Eliaz, 2019). En la Tabla 2 se presentan los niveles seguros y de toxicidad de los elementos de constituyentes de cada aleación.

Tabla 1. Propiedades del hueso y de aleaciones metálicas utilizadas en implantes ortopédicos. (Amin, Nallajennugari & Chahal. 2025)

Material	Hueso	Acero inoxidable 316 LVM	Aleaciones de magnesio	Aleación Co-28.5Cr-6Mo.	Aleación Ti-6Al-4V ELI
Modulo elástico (GPa)	15-30	200	45	248	110
Límite elástico (MPa)	130-180	434	100-250	827	795
Densidad g/cm³	1.85-2.1	8	1.74-1.84	8.47	4.43

La corrosión es la reacción química del metal con su entorno, generando una degradación continua del metal en productos como óxidos, hidróxidos u otros compuestos. El fluido del cuerpo humano contiene agua, oxígeno disuelto, proteínas y diversos iones como cloruro e hidróxido, por ello representa un entorno muy agresivo para los metales utilizados en implantes. La resistencia a la corrosión de un material de implante metálico es, por lo tanto, un aspecto importante de su biocompatibilidad. (Park & Lakes, 2007). La Figura 1, muestra una comparativa de los valores de densidad y velocidad de corrosión de los diferentes materiales para uso de implantes biomédicos.

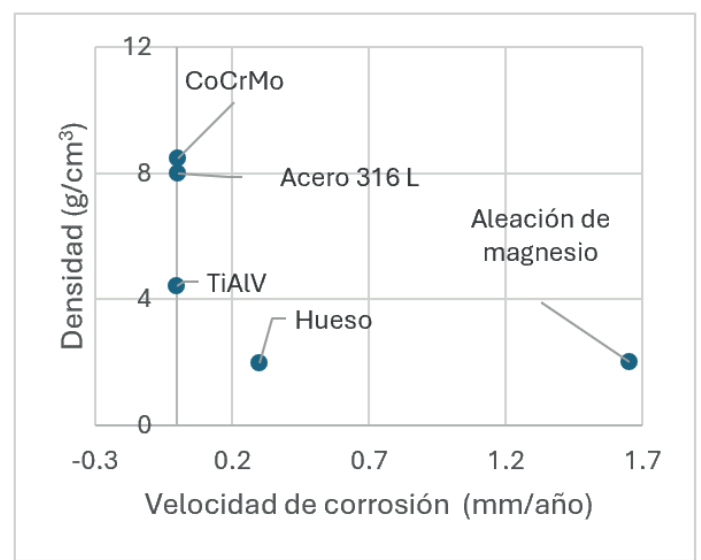


Figura 1. Gráfica de comparación de densidad y velocidad de corrosión entre el hueso y las aleaciones usadas en implantes ortopédicos.

Según la norma oficial mexicana NOM-087-SEMARNAT-SSA1 los Residuos Peligrosos Biológico-Infecciosos (RPBI) son todos aquellos objetos o materiales impregnados de sangre fresca, fluidos corporales, secreciones o tejidos humanos, ya sea en laboratorios, hospitales o quirófanos. Los implantes biomédicos que se extrajeron del cuerpo humano se consideran de este tipo de residuos y deben almacenarse correctamente, después se le da tratamiento para eliminar riesgo biológico el cual puede ser esterilización o incineración y pasan a ser residuo metálico inerte, por protocolo de bioseguridad estos metales no suelen ser reciclados. Las aleaciones de magnesio al degradarse en el cuerpo humano no generan este tipo de residuos. (Lyons, Newell, Ghadimi, et al., 2021).

En cuanto a reciclaje hay casos particulares, la empresa OrthoMetals se dedica a la recuperación de metales estructurales de los féretros como en el interior del cuerpo difunto que salen de la cremación (Funeral Natural. 2022, 22 octubre.) El volumen de residuos metálicos de prótesis e implantes generados por cremación varía según las localidades. Así el promedio en Irlanda es de 180 gramos por cremación, y alrededor del 73 por ciento del metal residual en las cenizas son clavos, tornillos y otros elementos de los ataúdes; el 27 por ciento lo forman implantes o prótesis de caderas, rodillas, y otros huesos, etc.

Tabla 2. Toxicidad sistémica de los elementos metálicos liberados por implantes ortopédicos y principales efectos asociados a su exposición.

	Elemento	Niveles promedios seguros en suero sanguíneo (µg/L)	Niveles tóxicos sistémicos (µg/L)	Posibles síntomas de toxicidad	Referencia
Acero inoxidable 316 LVM	Fe	Fe ²⁺ -Fe ³⁺ 600-1800	Fe ²⁺ -Fe ³⁺ > 5000	Síntomas gastrointestinales agudos, generación de radicales libres, artritis, miocardiopatía y cirrosis.	(Badhe et al., 2021)
	Cr	Cr ³⁺ 0.2-1.5	Cr ⁶⁺ >15	Cr ³⁺ , Posibles problemas hepáticos y renales. Cr ⁶⁺ , Síntomas respiratorios, dermatitis, ulceración, síntomas gastrointestinales y cáncer de pulmón.	(Badhe et al., 2021)
	Ni	Ni ²⁺ <2	Ni ³⁺ -Ni ⁴⁺ > 10	Hipersensibilidad reumatoid, cefalea, vértigo, náuseas, sensación de vómito, alteraciones visuales.	(Badhe et al., 2021)
CoCrMo	Co	Co ²⁺ 0.1-0.4	Co ²⁺ >5	Cardiomiopatía, alteración de la función tiroidea, policitemia, dermatitis alérgica de contacto (DAC).	(Badhe et al., 2021)
	Mo	Mo ⁶⁺ 0.3-1.5	Mo ²⁺ >3	Acido úrico elevado/gota, testosterona reducida, deficiencia secundaria de cobre y psicosis aguda con alucinaciones, convulsiones y otros síntomas neurológicos.	(Badhe et al., 2021)
	Mn	Mn ²⁺ 0.4-0.85	Mn ²⁺ >5	Dolor de cabeza, síntomas psiquiátricos, síntomas gastrointestinales, signos y síntomas similares a los del Parkinson.	(Badhe et al., 2021)
Mg-Zn-Ca	Mg	Mg ²⁺ 15000-22000	Mg ²⁺ >26000	Su causa principal es la insuficiencia renal. Los síntomas abarcan hipotensión arterial, depresión respiratoria y paro cardíaco.	Tavasoli et al. (2024) (Lewis III, 2025)
	Zn	Zn ²⁺ 700-1140	Mg ²⁺ >8000	Deficiencia secundaria de cobre, resistencia a la insulina	Tavasoli et al. (2024)
	Ca	Ca ²⁺ 88000-108000	Ca ²⁺ >140000	Insuficiencia renal, (arritmia), confusión, coma.	Tavasoli et al. (2024) (Cleveland Clinic, 2022)
Ti-Al-V	Ti	Ti ⁴⁺ <1	Ti ⁴⁺ >10	Síndrome de las uñas amarillas	(Badhe et al., 2021)
	Al	Al ³⁺ <5	Al ³⁺ >30	Osteomalacia, disprexia, anemia, diarrea, disfunción hepática, temblor, ataxia, mioclonías, asociación con la enfermedad de Alzheimer	(Badhe et al., 2021)
	V	V ⁴⁺ -V ⁵⁺ 0.02-2.3	V ⁵⁺ > 3	Debilidad, temblores, dolor de cabeza, síntomas gastrointestinales, daño al sistema nervioso, hemorragia hepática y renal.	(Badhe et al., 2021)

Los metales preciosos representan sólo el 0,1 por ciento y aproximadamente la mitad de eso es paladio, que se utiliza en empastes dentales (Funeral Natural. 2022, 22 octubre). Durante la cremación, los metales preciosos se funden, se fragmentan y eventualmente se mezclan con los restos en forma de polvo.

En 2018, OrthoMetals había recuperado 90 toneladas de metales ortopédicos de 170 crematorios en Francia. En España (donde esta empresa está presente sólo desde 2012 y tiene acuerdos con 98 crematorios) ha recuperado unas 35 toneladas de metales. En Barcelona se calcula que los residuos metálicos de promedio son de unos 320 g por cremación y en París de unos 360 g.

El proceso de manufactura influye directamente en el impacto ambiental, se descubrió que cuando se considera todo el ciclo de vida del implante, el proceso de fusión por haz de electrones (EBM) es un método más ecológico para producir el implante. Esto se debe principalmente a la compleja geometría del implante. Para geometrías complejas, se genera mucho material de desecho mediante procesos de fresado. (Lyons, Newell, Ghadimi, et al., 2021).

La Figura 2 muestra los datos de huella de carbono de la producción primaria, además del uso de agua empleado en la fabricación para las aleaciones de Ti-6Al-4V que destacan con la huella de carbono más alta, del acero inoxidable 316 L, y aleaciones Co-Cr con el mayor uso de agua empleado en su fabricación, por falta de información de las aleaciones de magnesio en uso biomédico, como referencia se tiene la huella de carbono de la producción de magnesio, el uso de agua se desconoce.

La comparación evidencia que las diferencias en huella de carbono y consumo de agua entre las aleaciones pueden ser un criterio adicional para la selección de biomateriales. En este aspecto, las aleaciones de magnesio presentan una ventaja potencial al degradarse in vivo, reduciendo la generación de residuos metálicos asociados al retiro del implante.

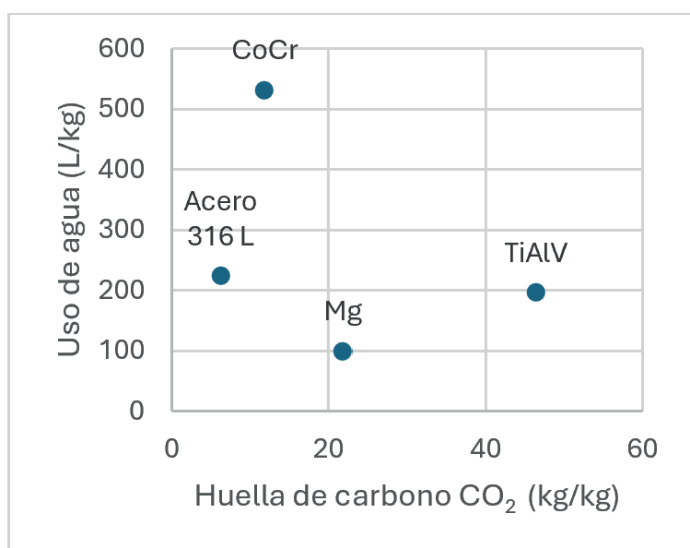


Figura 2. Gráfica comparativa de la huella de carbono y el uso de agua para la fabricación de algunas aleaciones. (Datos tomados de: De Bortoli et al., 2019, Ehrenberger, 2020)

Existe una falta de información de costos de las aleaciones de magnesio al estar en proceso de investigación aún, el costo de la aleación MgZnCa fue calculado en el estudio referenciado usando los costos individuales de cada elemento y las operaciones implicadas en su desarrollo sin considerar la forma del producto final, esta información nos dice que estas aleaciones podrían tener un costo similar a las aleaciones de titanio.

El costo del Magnesio es de aproximadamente \$44.4/kg, el del zinc de \$55.5/kg y el del calcio metálico es de \$144.11/kg.(Shanghai Metals Market, 2025).

Usando como referencia una aleación Mg4Zn0.5Ca, se calcula un precio de 45.34\$/kg añadiendo el costo de procesamiento en die casting que es de 190\$/kg obtenemos un costo de 235.34\$/kg. (Zhang, Y. 2024, agosto 21).

Discusiones

El uso de implantes temporales que ayuden a la regeneración ósea durante el proceso de osteogénesis requiere de materiales biodegradables, de esta manera se evita una segunda intervención para ser removidos.

Dentro de las aleaciones metálicas, las aleaciones de magnesio son uno de los principales candidatos , por su biodegradabilidad y propiedades similares al hueso, como su densidad y módulo elástico que es el más cercano al hueso lo cual ayuda a evitar el fenómeno de stress shielding, se han estudiado diferentes aleaciones de magnesio para fines biomédicos, en los cuales se utiliza la ciencia de materiales para mejorar las propiedades del magnesio, buscando resolver los problemas de corrosión rápida y evolución de gas hidrogeno. A pesar de los avances, persisten desafíos en sincronizar la degradación con los tiempos de curación ósea, especialmente en pacientes con osteoporosis o diabetes, en la actualidad estas aleaciones siguen en estudio, pero sus aplicaciones ya son una realidad, en Alemania, la empresa Syntellix desarrolla pines de la aleación MAGNEZIX de MgYReZr y en Korea del sur la empresa U&I desarrollo los tornillos K-MET de MgCaZn.

Los implantes tradicionales como lo son los de aleaciones de Ti-6Al-4V, acero inoxidable 316LMV y Co-Cr-Mo, tienen un módulo elástico alto. Principalmente la aleación base cobalto, posee la mayor densidad y modulo elástico, en cuanto resistencia a la corrosión, tienen velocidades de corrosión bajas, siendo un poco mayor entre ellas la del acero inoxidable, pero tienen la desventaja de liberar iones tóxicos en el cuerpo del paciente.

En cuestiones de impacto ambiental, las aleaciones de magnesio tienen una ventaja ecológica, ya que se degradan in vivo, de esta manera no generan residuos metálicos con que lidiar después, las aleaciones de Titanio tienen la mayor huella de carbono, después del magnesio, y el uso de agua para la fabricación es muy alta para la aleación base cobalto. (Lyons, Newell, Ghadimi, et al., 2021)

En términos de costos a pesar de que las aleaciones de magnesio son una muy buena opción estas son más costosas a comparación de las de acero inoxidable que son las más económicas.

Las investigaciones recientes coinciden en que las aleaciones de magnesio representan una de las alternativas más prometedoras para implantes ortopédicos temporales debido a su biodegradabilidad y a sus propiedades mecánicas similares a las del hueso. Sin embargo, mientras algunos estudios destacan que los avances en composición química y tratamientos superficiales han permitido mejorar significativamente su comportamiento frente a la corrosión, otros señalan que el control de la velocidad de degradación continúa siendo el principal reto para su aplicación generalizada. En contraste, las aleaciones convencionales mantienen un desempeño mecánico y una resistencia a la corrosión superiores, aunque presentan la desventaja de requerir, en muchos casos, una segunda cirugía para su extracción y de liberar iones metálicos potencialmente tóxicos.

Conclusiones

Al realizar la comparación de propiedades de las diferentes aleaciones metálicas usadas en implantes biomédicos, las aleaciones no biodegradables Ti-6Al-4V ELI, acero inoxidable 316 LVM y la aleación cobalto-cromo-molibdeno Co-28.5Cr-6Mo poseen en general mejores propiedades mecánicas y mayor resistencia a la corrosión, sin embargo, las aleaciones de magnesio tienen propiedades mecánicas similares al hueso y una corrosión que podría ajustarse al proceso de recuperación del hueso, por ello son una buena elección para el uso en implantes temporales, su uso no implicaría un aumento excesivo en los costos y en la huella de carbono, tal como lo hace el uso de aleaciones Co-Cr-Mo. Las aleaciones de magnesio ofrecen una ventaja significativa en términos de sostenibilidad, su huella de carbono no es tan excesiva, y al degradarse in vivo no se generan residuos metálicos ya que los productos intermedios formados por su degradación son bioabsorbibles, y el exceso puede ser excretado por los riñones, a diferencia de los implantes metálicos permanentes, que si permanecen en el cuerpo, además de ocasionar dolor u otras complicaciones, generan residuos metálicos cuando se retira o bien en la muerte del paciente en caso de cremación. Además, se ha demostrado que los implantes a base de magnesio estimulan la formación de nuevo hueso cuando se implantan como dispositivos óseos (Bairagi, D., & Mandal, S. 2021).

El acero en cambio es uno de los menos costosos y de menor huella de carbono, pero es un material susceptible a corrosión por picadura,

y su uso en aplicaciones temporales trae consigo el gasto de una segunda operación para removerlo o de no ser removida implica un posible riesgo a la salud por la exposición a iones metálicos tóxicos, además pueden causar osteólisis (pérdida de tejido óseo) e impedir la formación de hueso.

Es importante mencionar que esta comparación podría hacerse más adelante cuando se revele más información de las aleaciones de magnesio, que aún se encuentran en investigación y así seleccionar con mayor seguridad y de manera específica la aleación de magnesio que sea comparada, pero por ahora se puede considerar como una alternativa viable al no generar residuos metálicos, reducir costos de operación, alta biocompatibilidad y propiedades similares al hueso.

Con base en la evidencia analizada, se considera que la selección del material para un implante ortopédico temporal no debe realizarse únicamente en función de su resistencia mecánica, sino del equilibrio entre soporte estructural, biodegradabilidad, biocompatibilidad y comportamiento frente a la corrosión. En este sentido, aunque las aleaciones tradicionales continúan ofreciendo un excelente desempeño mecánico, las aleaciones de magnesio presentan ventajas clínicas que justifican el creciente interés en su desarrollo. No obstante, su implementación debe evaluarse considerando el tipo de fractura, el tiempo esperado de consolidación ósea y las condiciones fisiológicas del paciente, por lo que el desarrollo de nuevas aleaciones y tratamientos superficiales seguirá siendo determinante para ampliar su aplicación clínica.

Referencias

- [1] Amin, V. Y., Nallajennugari, S. R., & Chahal, R. S. (2025). The efficacy of biodegradable magnesium-based implants in orthopedic surgery. *International Archives of Orthopaedic Surgery*, 8(1), 043. <https://doi.org/10.23937/2643-4016/1710043>
- [2] Bairagi, D., & Mandal, S. (2021). A comprehensive review on biocompatible Mg-based alloys as temporary orthopaedic implants: Current status, challenges, and future prospects. *Journal of Magnesium and Alloys*, 10(3), 627–669. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.09.005>
- [3] Badhe, R. V., Akinfosile, O., Bijukumar, D., Barba, M., & Mathew, M. T. (2021). Systemic toxicity eliciting metal ion levels from metallic implants and orthopedic devices – A mini review. *Toxicology Letters*, 350, 213–224. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2021.07.004>

- [4] Carlos-Rivera, F., Guzmán-Caniupan, J. A., Camacho-Cordero, L. M., Aubry de Maraumont, T., & Soria-Suárez, N. (2024). Estimated frequency and economic burden of incident fragility fractures during 2023 in Mexico. *Archives of Osteoporosis*. <https://doi.org/10.1007/s11657-024-01468-2>
- [5] Clark, P., Montiel-Ojeda, D., Rascón-Pacheco, R. A., Guagnelli, M. A., Lopez-Gonzalez, D., Bremer, A., & Borja-Aburto, V. H. (2022). Fracture incidence in children and adolescents 0–19 years old in Mexico: A 12-year cross-sectional analysis. *Archives of Osteoporosis*, 17. <https://doi.org/10.1007/s11657-022-01162-1>
- [6] Cleveland Clinic. (2022, August 5). Hypercalcemia: What it is, causes, symptoms & treatment. <https://my.clevelandclinic.org/health/diseases/14597-hypercalcemia>.
- [7] De Bortoli, L. S., Schabbach, L. M., Fredel, M. C., Hotza, D., & Henriques, B. (2019). Huella ecológica de los biomateriales para implantología: ¿Es la práctica libre de metales un cambio ecológico? *Journal of Cleaner Production*, 213, 723–732. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.189>
- [8] Eliaz, N. (2019). Corrosion of metallic biomaterials: A review. *Materials*, 12(3), 407. <https://doi.org/10.3390/ma12030407>
- [9] Ehrenberger, S., & Friedrich, H. E. (2020). Carbon footprint of magnesium production and its use in transport applications. https://elib.dlr.de/140926/1/2020-10-30_IMA_LCA-Study_Report_Update.pdf
- [10] Jin, W., & Chu, P. K. (2019). Orthopedic implants. *Encyclopedia of Biomedical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801238-3.10999-7>
- [11] Lewis III, J. L. (2025, June). Hipermagnesemia. En G. D. Braunstein (Revisor), *MSD Manuals – Versión profesional*. Merck & Co., Inc.
- [12] Lyons, R., Newell, A., Ghadimi, P., et al. (2021). Environmental impacts of conventional and additive manufacturing for the production of Ti-6Al-4V knee implant: A life cycle approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112, 787–801. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06367-7>
- [13] Mingo-Robinet, J., & Pérez Aguilar, M. (2021). Implant removal of osteosynthesis: Results of a survey among Spanish orthopaedic surgeons. *Revista Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología*, 65(5), 331–339. <https://doi.org/10.1016/j.recot.2021.05.008>
- [14] Park, J. B., & Lakes, R. S. (2007). *Biomaterials: An introduction* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-37880-0>
- [15] Recuperación de metales en los crematorios. (2022) Funeral Natural. https://www.funeralnatural.net/articulos/recuperacion-de-metales-en-los-crematorios?utm_source
- [16] Shanghai Metals Market. (2025). Shanghai Metals Market. <https://www.metal.com/>
- [17] Shrestha, R., Shrestha, D., Dhoju, D., Parajuli, N., Bhandari, B., & Kayastha, S. R. (2013). Epidemiological and outcome analysis of orthopedic implants removal in Kathmandu University Hospital. *Kathmandu University Medical Journal*, 11(2), 139–143. <https://doi.org/10.3126/kumj.v11i2.12489>
- [18] Tavasoli, A., Afsharkhas, L., & Parvini, B. (2024). Evaluating the serum levels of zinc, copper, magnesium, and 25-hydroxy vitamin D in children with idiopathic drug-resistant epilepsy: A cross-sectional study. *BMC Pediatrics*. <https://doi.org/10.1186/s12887-024-04968-w>
- [19] Zhang, Y. (2024) Die casting costs: How to figure out the cost of die-casting? Proleantech. <https://proleantech.com/die-casting-costs/>



Paulina Delfina Caballero Barrera.

Es estudiante de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales, destacándose por su compromiso académico y su interés en el estudio de materiales de ingeniería. Se caracteriza por ser una persona responsable, dedicada y con gran

disposición para aprender, lo que le ha permitido mantener un desempeño académico sobresaliente. Su interés se centra en la comprensión de los procesos metalúrgicos y el comportamiento de los materiales.



M.E. Ivonne Kado Mercado-Elías.

Ingeniera Metalurgista y de Materiales por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) y Maestra en Educación Basada en Competencias por la Universidad del Valle de México (UVM). Ha desarrollado su

trayectoria profesional en el área de minerales, con especial enfoque en el análisis de materiales, así como en procesos de hidrometalurgia y electrometalurgia. Ha supervisado proyectos en el ámbito de materiales con la empresa IMAGO Aerospace y se ha destacado como divulgadora científica mediante charlas, talleres y actividades de promoción del conocimiento científico y tecnológico.



Dra. Verónica Elvira Salazar

Muñoz. Doctora en Ingeniería y Ciencia de los Materiales por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), donde también obtuvo la Maestría en Metalurgia e Ingeniería de Materiales y el título de Ingeniera Metalurgista y de Materiales.

Sus líneas de investigación incluyen la síntesis y caracterización de materiales cerámicos magnéticos basados en tierras raras; la evaluación y mejora del desempeño mecánico de aleaciones ferrosas y no ferrosas mediante tratamientos térmicos y procesos de deformación plástica severa; así como la caracterización de las propiedades físicas y químicas de materiales. Además, participa activamente en actividades de divulgación científica y formación de jóvenes investigadores.

Daniela Benítez Proa.

Es estudiante de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP). Con una trayectoria académica marcada por la responsabilidad y la entrega, ha desarrollado una profunda vocación

por el procesamiento de minerales, área donde busca integrar la innovación tecnológica con la eficiencia industrial. Daniela se proyecta como una profesional dedicada a evolucionar los procesos metalúrgicos, aportando una mirada creativa y rigurosa a los desafíos de la industria moderna.

Hanna Paola Florencio Ávila.

Estudiante de Ingeniería Metalurgia y de Materiales en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP). Se destaca por su participación en el ámbito de procesamiento de minerales y en eventos de divulgación científica, ha participado en prácticas profesionales

en Sonora y Zacatecas, con un marcado interés en la metalurgia extractiva.

Tiene como objetivo profesional desarrollarse en el área extractiva, contribuyendo al cuidado del medio ambiente y a el desarrollo metalúrgico.

Los Hongos Micorrízicos Activan el Alertamiento Vegetal de *Coriandrum sativum* a Través de la Comunicación Aérea



Viady Naomi Poot-Chay¹ viady.k.pop@gmail.com

Addy Patricia Pool-Cruz¹ addy.pc@conkal.tecnm.mx

San Germán Bautista-Parra¹ sangerman.bp@conkal.tecnm.mx

Helbert Mena-Martín¹ helbert.mm@conkal.tecnm.mx

Horacio Salomón Ballina-Gómez¹ horacio.bg@conkal.tecnm.mx

¹Tecnológico Nacional de México/IT de Conkal

ABSTRACT. -

This study evaluates whether arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) can induce plant priming in neighbor Coriandrum sativum plants through airborne communication. An experimental design was established with AMF-inoculated emitter plants and receiver plants placed at varying distances (15, 30, 50, 100, and 200 cm), preventing root contact. Growth variables, physical defense (leaf hardness and thickness), and natural herbivory were measured at 90 days. Using generalized linear mixed models, contingency tables, principal component analysis, and multiple-response permutation procedures, it was observed that a non-linear distance-dependent response was observed: receiver plants at 100 cm exhibited greater growth (stem length), whereas physical defense (leaf hardness) peaked at 30 cm. Furthermore, mycorrhized plants isolated from communication (Positive Control) suffered the highest herbivory by chewing insects, suggesting that enhanced nutrition without warning signals increases palatability. It is concluded that mycorrhizal symbiosis modulates the physiology of neighboring plants exclusively through volatile organic compounds (VOCs), optimizing either growth or defense depending on proximity. These findings suggest the potential of using mycorrhized plants as strategic emitters in the agroecological management of cilantro, acting as biological barriers or growth promoters without the need for total crop inoculation.

Keywords: growth; herbivory; resistance; volatile organic compounds

RESUMEN.-

Este estudio evalúa si los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) pueden inducir alertamiento vegetal (priming) en plantas vecinas de Coriandrum sativum mediante comunicación aérea. Se estableció un diseño experimental con plantas emisoras inoculadas con HMA y plantas receptoras situadas a distintas distancias (15, 30, 50, 100 y 200 cm), impidiendo el contacto radicular. Se midieron variables de crecimiento, defensa física (dureza y grosor foliar) y herbivoría natural a los 90 días. Mediante modelos lineales generalizados mixtos, tablas de contingencia, análisis de componentes principales y permutaciones de respuestas múltiples, se observó una respuesta no lineal dependiente de la distancia: las plantas receptoras a 100 cm presentaron mayor crecimiento (longitud de tallo), mientras que la defensa física (dureza foliar) fue mayor a los 30 cm. Además, las plantas micorrizadas pero aisladas de la comunicación (Control Positivo) sufrieron la mayor herbivoría por insectos masticadores, sugiriendo que la nutrición sin señales de alerta incrementa la palatabilidad. Se concluye que la simbiosis micorrízica modula la fisiología de plantas vecinas exclusivamente a través de señales volátiles (COVs), optimizando el crecimiento o la defensa según la proximidad. Estos hallazgos sugieren el potencial de usar plantas micorrizadas como emisoras estratégicas en el manejo agroecológico del cilantro.

Palabras clave: crecimiento, herbivoría, resistencia, compuestos orgánicos volátiles

I. INTRODUCCIÓN

Los hongos formadores de micorriza arbuscular (HMA) están presentes en más del 80% de los suelos y en cerca del 90% de las especies vegetales [1]. Esta simbiosis, de carácter mutualista, beneficia tanto al hongo como a la planta, sin ocasionar perjuicio a ninguno de los

organismos involucrados. Asimismo, los HMA son simbiontes obligados, es decir, requieren la asociación con raíces de plantas para completar su ciclo de vida [2]. Los HMA se desarrollan en el suelo y escapan a la observación directa, aunque tienen una función esencial en la salud del ecosistema edáfico. Particularmente, los HMA del tipo arbuscular han adquirido un valor relevante por su capacidad de fortalecer las plantas mediante múltiples mecanismos [3], [4]. Esta asociación simbiótica mejora la degradación de materia orgánica, optimiza la absorción de nutrientes poco móviles como el fósforo, incrementa la tolerancia de las plantas a condiciones adversas y limita la acción de patógenos radiculares [3], [5]. Uno de los aspectos emergentes en el estudio de las interacciones planta-hongo es su influencia sobre la comunicación aérea entre plantas. A través de compuestos orgánicos volátiles (COVs), las plantas pueden intercambiar señales de advertencia frente a condiciones de estrés biótico, generando respuestas defensivas en individuos vecinos [6]. Este fenómeno puede ser potenciado por la presencia de micorrizas, las cuales inducen un estado de alerta fisiológica conocido como alertamiento vegetal (plant defense priming), que prepara a la planta para responder de manera más rápida y eficaz ante ataques de herbívoros o patógenos [7], [8]. En este contexto, Coriandrum sativum L., planta perteneciente a la familia Apiaceae, constituye un modelo idóneo de estudio ya que es una especie aromática de amplio uso culinario y medicinal a nivel mundial [9], con una notable importancia económica y cultural en regiones como India, Tailandia, China, México, el Caribe, el Mediterráneo, el norte de África y Europa del Este [10], [11]. En América, su introducción temprana tuvo como propósito la conservación de carnes y su uso como hierba medicinal [12]. Para 2023, México cultivó aproximadamente 7,422 hectáreas anuales de cilantro en 23 estados [13], posicionándose como el tercer productor mundial [14]. No obstante, esta especie presenta susceptibilidad a enfermedades fúngicas, aunque se ha documentado cierta repelencia frente a insectos [15], lo que sugiere la existencia de mecanismos de defensa aún poco comprendidos. El papel funcional de las micorrizas en la activación de dichos mecanismos mediante comunicación aérea es todavía poco explorado, especialmente en especies de interés agrícola. Por ello, el presente estudio evalúa el efecto de los hongos micorrízicos en la activación del alertamiento vegetal, en términos de crecimiento y defensa, de Coriandrum sativum a través de la comunicación aérea.

II. OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS

Evaluar el efecto de los hongos micorrízicos arbusculares en la activación del alertamiento vegetal de *Coriandrum sativum* a través de la comunicación aérea, en términos de crecimiento, defensa física y susceptibilidad a la herbivoría.

III. METODOLOGÍA

A. Sitio de estudio

El trabajo se realizó en una parcela delimitada de 20 x 30 m ubicada en el municipio de Telchac Pueblo (21°12'15" de latitud Norte, 89°16'34" de longitud Oeste), a una altura de 4 msnm. El sitio presenta un clima tropical subhúmedo con tres estaciones: lluvias (julio-octubre), nortes (noviembre-febrero) y sequías (mar-zo-junio). Además, cuenta con una precipitación y temperatura anual promedio de 93.3 mm y 26.4 °C, respectivamente [16].

B. Obtención de plántulas

Se utilizaron semillas comerciales de cilantro (Hortaflor®), las cuales se sembraron en semilleros y fueron desinfectadas previamente con hipoclorito de sodio al 1% y luego se enjuagaron con abundante agua corriente por cinco minutos. Se eliminaron las que tuvieron grietas y el resto se dejó reposar en agua alrededor de 24 h. Se utilizó el método de flotación para descartar las semillas dañadas de las semillas fértiles. Las semillas se sembraron directamente en bolsas de 2 kilos, previamente llenadas con suelo de tipo lep-tozol esterilizado con agua hirviendo. En cada bolsa se realizó un orificio de 1 cm de profundidad y se sembró una semilla. Las semillas destinadas a los tratamientos con micorriza se dejaron reposar durante 24 h en una solución preparada con 4 g del consorcio de hongos micorrízicos (Glumix®) (Composición: 20,000 esporas viables por kg) en 20 ml de agua por semilla. El riego se realizó dos veces al día o a demanda. Todas las plantas se mantuvieron bajo una malla sombra de 70% de luz, ya que se ha registrado que el cilantro no tolera altas cantidades de luz del sol [17].

C. Diseño experimental

Cuando las plántulas tuvieron 10 días de edad, se estableció un diseño sistemático con ocho tratamientos colocados estratégicamente en filas (Fig. 1): planta inoculada con hongos micorrízicos (inoculada con 4 g), seguida de plantas receptoras a 15, 30, 50, 100 y 200 cm (orientadas hacia el norte y sin aplicación de micorrizas); y, dos plantas control, negativo (CN) (sin inoculación de hongos micorrízicos) y positivo (CP) (inoculadas con 4 g de hongos micorrízicos). Ambas plantas control se colocaron al menos a 2 m de distancia en forma equidistante con el resto de las plantas y

se mantuvieron incomunicadas totalmente por aire. Todos los tratamientos se replicaron 10 veces (n total de plántulas = 50).

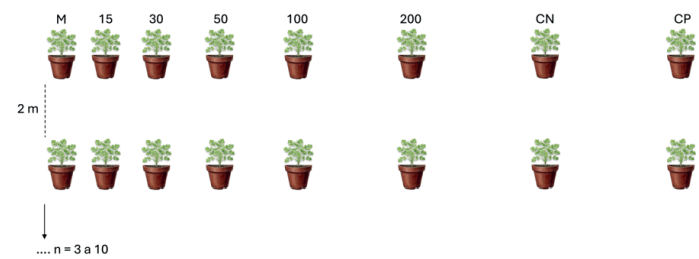


Fig. 1. Esquema del diseño experimental en plantas de *Coriandrum sativum* alertadas por hongos micorrízicos.

D. Crecimiento, defensa vegetal y herbivoría

Se midieron todas las plantas de cada tratamiento que sobrevivieron hasta el final del experimento (90 días de edad), con excepción de los tratamientos de 50 cm de comunicación y el control negativo con 9 y 7 plantas, respectivamente; el resto de los tratamientos tuvieron 10 plantas. Como variables de crecimiento se registró: la longitud del tallo (cm) con un flexómetro convencional desde la base del tallo hasta el ápice de la hoja más larga, el número de hojas, el diámetro del tallo (mm) con un vernier digital (Mitutoyo, modelo CD67-S15PS JPN) y el área foliar (cm²) mediante foto-grafías procesadas con el programa ImageJ. Como variables de defensas físicas: el grosor (mm) con un micrómetro digital (Mitutoyo, modelo H-2780 JPN) y la dureza foliar (g cm⁻²) con un penetómetro de bolsillo (AMS, modelo 59032 OSHA, EUA). Estas dos variables se registraron de hojas compuestas de la última hoja compuesta, ubicada en el estrato superior de la planta. Todas las medidas se realizaron en el limbo de las hojas y no sobre las nervaduras. Se registró la frecuencia de los tipos de herbivoría [18] en todas las plantas experimentales al final del experimento (90 días).

E. Producción de ramas, umbelas y umbélulas

Al final del experimento (90 días de edad de las plantas), se registró el número de ramas, umbelas y umbélulas en las 10 plantas de los tratamientos, excepto en la distancia de 50 cm (n= 9) y el control negativo (n= 7).

F. Colonización micorrízica

Al final del experimento (90 días de edad de las plantas), se determinó la colonización micorrízica por medio de observación de la raíz a través del tratamiento adaptado de Phillips y Hayman [19]. Para ello, se limpió la raíz y se realizaron cortes cercanos a la raíz principal. Se clarificó la

raíz con KOH al 2.5% en baño María a 90 °C por 30 min. Se realizó la acidificación con HCL al 1% por 30 min a temperatura ambiente. Luego, se tiñó la raíz con azul de metileno en glicerina ácida (0.05%) por 20 min a 90 °C. Se observaron 10 fragmentos de raíz de 1 cm de longitud, colectadas por planta (n= 3 por tratamiento). Se usó un microscopio estereoscopio de 40X con una cámara Ampere MD130. Se usó la escala de clases de Trouvelot [20] para determinar la abundancia de arbusculos en el sistema radicular (A) con el programa Mycocalc.

G. Análisis de datos

Para evaluar el efecto de la distancia de la comunicación vegetal se realizaron modelos lineales generalizados mixtos en el crecimiento, defensa y colonización micorrízica. En los cuales se trató como factor fijo a la distancia de comunicación y como factor aleatorio, cada planta por tratamiento. En el caso del crecimiento, con la longitud y diámetro del tallo, y el área foliar se usaron distribuciones Gamma con funciones de enlace Log. Con el número de hojas se usó una distribución Negativa binomial y una función de enlace Log. Con la dureza y grosor foliar se usó una distribución Normal y una función de enlace Identity. Con la abundancia de arbusculos [A (%)], una distribución Normal y una función de enlace Identity. En todos los casos, se realizaron comparaciones pareadas de LSD Fisher. Estos análisis se realizaron con el software estadístico Infostat.

Para examinar la asociación de las distancias de comunicación vegetal con los tipos daños por herbivoría se realizó una tabla de contingencia de 9 (distancias de comunicación vegetal) × 4 (tipos de daño por herbivoría). Este análisis se realizó con el software estadístico jamovi.

Por otro lado, para evaluar las relaciones de crecimiento (área foliar, número de hojas, diámetro y longitud del tallo), defensa (grosor y dureza foliar) y reproducción (número de flores, ramas, umbelas y umbélulas) entre las distancias de comunicación vegetal, se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA) y un Procedimiento de Permutación de Respuestas Múltiples para identificar diferencias potenciales entre grupos de variables. Este análisis se realizó con el software estadístico PC-ORD 7.08.

IV. RESULTADOS

A. Crecimiento y defensa vegetal

En términos de crecimiento, se encontraron efectos estadísticamente significativos en la longitud ($\chi^2 = 28.1$, gl= 7, $P = 0.0002$), número de hojas ($\chi^2 = 38.6$, gl= 7, $P < 0.0001$) y diámetro del tallo ($\chi^2 = 19.4$, gl= 7, $P = 0.006$). El área foliar no

presentó efectos estadísticamente significativos ($\chi^2 = 12.1$, gl= 7, $P = 0.09$). Se observó que la longitud del tallo fue incrementándose conforme la distancia de comunicación a las plantas con hongos micorrízicos (HM) aumentó, obteniéndose mayores longitudes de tallo en las plantas a 100 cm, los tratamientos control (CN y CP) fueron similares con las plantas con HM (Fig. 2). El número de hojas presentó un patrón similar a la longitud del tallo, solo que, en este caso, las plantas distanciadas a 30 cm fueron las que tuvieron más hojas. No hubo diferencias de las plantas con HM con los controles (CN y CP). En el diámetro del tallo se presentaron pocas diferencias, encontrándose mayores diámetros en las plantas distanciadas a 200 cm de las plantas con HM. Aquí se observó que el CP fue menor que al resto de los tratamientos (Fig. 2).

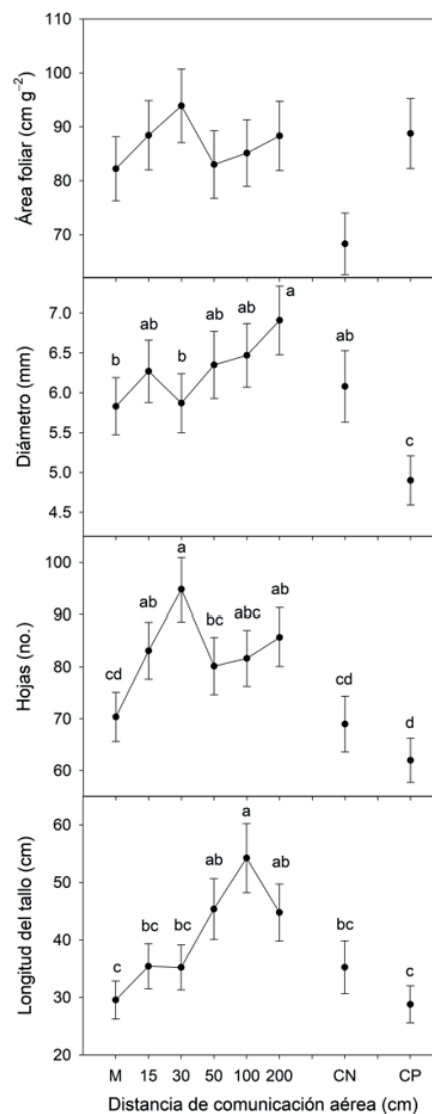
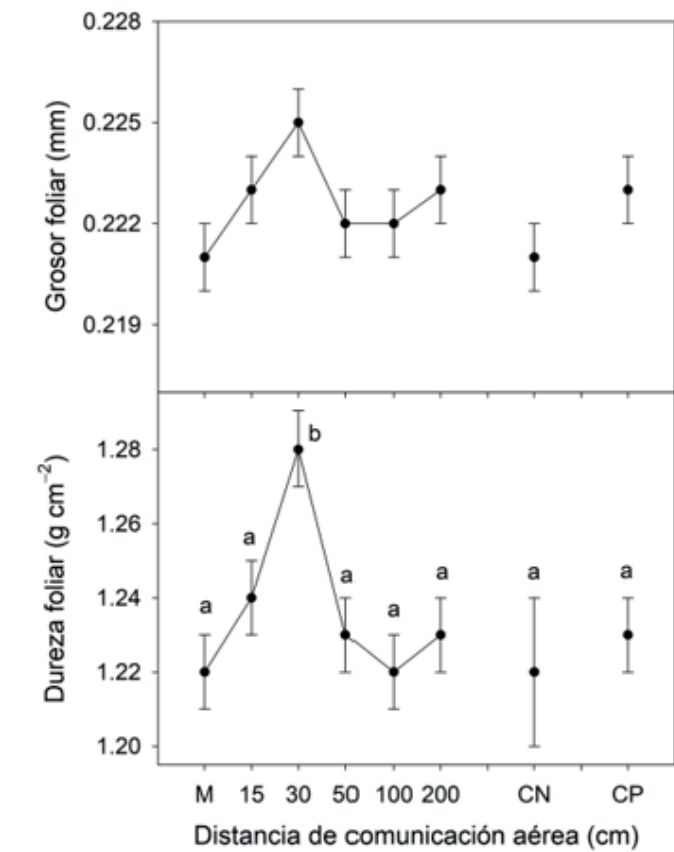


Fig. 2. Efecto de la comunicación vegetal en el crecimiento de plantas de cilantro. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas (LSD Fisher < 0.05). Las barras de error representan el error estándar (± 2).

En las defensas físicas, sólo la dureza foliar presentó diferencias estadísticamente significativas ($\chi^2 = 14.3$, $gl = 7$, $P = 0.04$), el grosor foliar no ($\chi^2 = 11.3$, $gl = 7$, $P = 0.12$) (Fig. 3).



B. Frecuencia de los tipos de herbivoría

La frecuencia de los tipos de daño fue estadísticamente significativa entre los tratamientos de comunicación aérea ($\chi^2 = 32.4$, $gl = 14$, $P = 0.003$). Los insectos masticadores registraron la mayor frecuencia de daño con el pico máximo en el control positivo. Mientras que los raspadores, tuvieron sus picos a los 50 y 200 cm. Los insectos succionadores mantuvieron una frecuencia similar a lo largo de las distancias de comunicación, exceptuando el control positivo (Fig. 4).

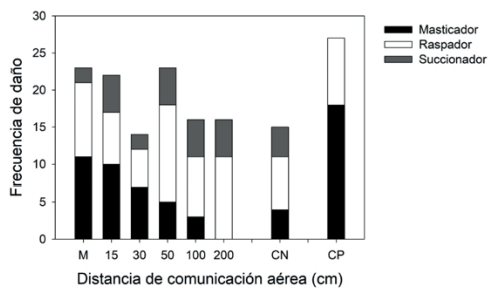


Fig. 4. Efecto de la comunicación aérea en la frecuencia de daño por herbivoría en plantas de cilantro.

C. Crecimiento – Defensa – Reproducción

El análisis de componentes principales (ACP) se realizó usando 10 variables de respuesta, cuatro de crecimiento (área foliar, número de hojas, diámetro y longitud del tallo), dos de defensa (grosor y dureza foliar) y cuatro de reproducción (número de flores, ramas, umbelas y umbélulas). Se seleccionaron tres componentes como los más importantes con eigenvalores (o valores propios) > 0.9 . Esos componentes explicaron el 71% de la variación. El primer componente (CP 1) explicó el 33% de la variación total en los datos originales y del segundo al cuarto, explicaron el 24, 14 y 9%, respectivamente. El resto de los componentes (CP 5- CP10) el 20% restante (100% de la variación) (Tabla I). El CP1 fue principalmente conformado por la longitud del tallo, el número de hojas y ramas; mientras que el CP 2, por el grosor, umbelas y umbélulas. En el PC 3 la contribución de las variables no fue muy definida, aunque el diámetro del tallo y la dureza foliar sobresalieron ligeramente. Por su parte, el CP 4 fue conformado mayormente por el número de flores (Tabla I; Fig. 5).

TABLA 1.

Varianza explicada por 10 componentes principales derivados de 10 variables de crecimiento, defensas y reproducción de *Coriandrum sativum*, y las correlaciones con las variables originales de cada componente.

	Eje de componentes principales			
	1	2	3	4
Valores propios	3.3	2.4	1.4	0.9
Proporción explicada	33	24	14	9
Proporción acumulada	33	57	71	80
Correlación con las variables originales				
Longitud (cm)	-0.69	-0.38	-0.28	0.00
Hojas (no.)	-0.70	0.37	-0.39	-0.07
Diámetro (cm)	-0.57	0.06	-0.55	0.10
Dureza (g cm ⁻²)	-0.55	0.58	0.51	0.00
Grosor (mm)	-0.41	0.65	0.44	-0.28
Área foliar (cm ²)	-0.54	0.42	-0.25	-0.34
Ramas (no.)	-0.69	-0.33	-0.03	0.29
Umbelas (no.)	-0.52	-0.70	0.33	-0.20
Umbélulas (no.)	-0.48	-0.72	0.31	-0.26
Flores (no.)	-0.47	0.17	0.32	0.71

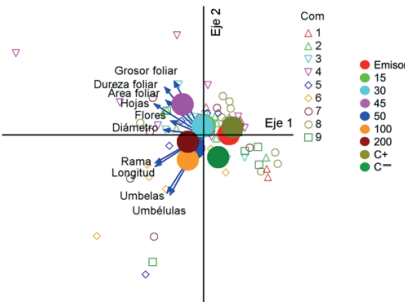


Fig. 5. Análisis de Componentes Principales de variables de comunicación vegetal de *Coriandrum sativum* activada por hongos micorrízicos, expresada en 10 variables de crecimiento (4), defensa (2) y reproducción (4).

El análisis global de MRPP no reveló diferencias estadísticamente significativas entre las variables de respuesta a grupal, de las distancias de comunicación (Estadístico de prueba $T=-1.146$; $p=0.128$). Además, el valor de concordancia intragrupal corregido por azar (A) fue cercano a cero ($A=0.018$), lo que indicó una baja homogeneidad dentro de los grupos, sugiriendo que la heterogeneidad observada dentro de los grupos es casi la misma que se esperaría por azar.

D. Micorriza arbuscular

Se observó que la abundancia de arbusculos en el sistema radicular difirió estadísticamente entre los tratamientos de distancia de comunicación (χ^2 Wald= 4.9, gl= 7, $P=0.0002$), siendo mayor en las plantas con hongos micorrízicos (HM) y mucho menor en el resto de los tratamientos y controles (Tabla II).

TABLA II.
Abundancia de arbusculos en plantas de cilantro expuestas a diferentes tratamientos de comunicación vegetal. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas (LSD Fisher $P<0.05$).

Distancia de comunicación (cm)	Arbusculos (%) (Media $\pm$ E.E.)
HM	1.56 $\pm$ 0.63a
15	0.11 $\pm$ 0.05bc
30	0.11 $\pm$ 0.05bc
50	0.002 $\pm$ 0.001c
100	0.005 $\pm$ 0.001c
200	0.11 $\pm$ 0.11bc
Control positivo	0.74 $\pm$ 0.28b
Control negativo	0.006 $\pm$ 0.006c

V. DISCUSIÓN

El presente estudio demuestra que la inoculación con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en plantas de *Coriandrum sativum* no solo altera el fenotipo del hospedero directo, sino que modula el crecimiento y la defensa de plantas vecinas a través de la comunicación aérea [6], [21]. El diseño experimental, al aislar las raíces en contenedores individuales, descarta cualquier transferencia de señales por contacto radicular o redes micorrízicas comunes (CMN). Por tanto, nuestros resultados confirman que la simbiosis micorrízica actúa como un modulador fisiológico local en la planta emisora, capaz de desencadenar efectos extendidos en la comunidad vegetal circundante exclusivamente mediante la emisión de

Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) [22], [23].

Uno de los hallazgos más notables fue la respuesta no lineal del crecimiento en función de la distancia. Las plantas receptoras situadas a distancias intermedias (30 a 100 cm) mostraron un mayor número de hojas y longitud de tallo en comparación con aquellas muy cercanas (15 cm) o muy lejanas (200 cm). Este patrón sugiere una respuesta dosis-dependiente en la señalización por volátiles. A distancias muy cortas, la concentración de COVs emitidos por la planta micorrizada podría ser excesivamente alta, induciendo una respuesta de competencia que frena el desarrollo lateral en favor del vertical, o bien, saturando los receptores olfativos de la planta vecina. Por el contrario, a los 100 cm, la dilución de la señal podría ser óptima para inducir un efecto de alertamiento (plant defense priming) que favorece la vigorosidad sin activar costosos mecanismos de defensa inmediatos [24]. Estudios recientes en otras especies hortícolas han observado que los perfiles de terpenos y metil-jasmonato emitidos por plantas micorrizadas pueden actuar como bioestimulantes en concentraciones específicas, promoviendo la división celular en plantas vecinas [25], [26].

Un resultado crucial fue la alta incidencia de herbivoría por insectos masticadores en el control positivo (CP), plantas que estaban micorrizadas pero aisladas de la comunicación. Tradicionalmente, se asume que la simbiosis micorrízica confiere resistencia (efecto de protección micorrízica). Sin embargo, nuestros datos alinean mejor con la Hipótesis del Balance Carbono-Nutrientes [27], [28]. Las plantas CP, al tener una asociación simbiótica efectiva, probablemente acumularon mayores contenidos de nitrógeno y fósforo en sus tejidos, volviéndose más palatables y nutritivas para los herbívoros generalistas. Al estar aisladas, estas plantas no recibieron señales de advertencia de conespecíficos dañados ni emitieron señales que pudieran rebotar en vecinas (autocomunicación), dejándolas vulnerables a pesar de su mejor estado nutricional. Esto contrasta con las plantas a 100-200 cm, que, aunque no micorrizadas, recibieron señales volátiles que pudieron activar la acumulación de metabolitos secundarios defensivos (dureza foliar), haciéndolas menos atractivas o más difíciles de ingerir.

El análisis de componentes principales (ACP) reveló una clara separación entre las variables de crecimiento y las de defensa física (grosor y dureza). Las plantas receptoras a 30 cm mostraron la mayor dureza foliar, coincidiendo con un

alto número de hojas, lo que desafía la idea clásica de que la de-fensa siempre tiene un costo negativo en el crecimiento. Es posible que el alertamiento inducido por los HMA optimice el uso de recursos, permitiendo a la planta preparar sus paredes celulares (lignificación o acumulación de sílice, reflejado en la dureza) sin sacrificar biomasa fotosintética. Este mecanismo de preparación es energéticamente más eficiente que la resistencia inducida directa, ya que las defensas solo se activan completamente tras el ataque, tal como sugieren Song et al. [8] y revisiones sobre la memoria inmunológica vegetal [29].

La colonización micorrízica se mantuvo restringida a las plantas inoculadas, confirmando que los efectos observados en las recep-toras fueron mediados exclusivamente por vías aéreas y no por redes de micelio común (CMN). Esto valida el potencial de usar plantas banco o emisoras inoculadas en cultivos de cilantro para proteger a hileras adyacentes sin necesidad de inocular todo el campo, una estrategia agronómica prometedora para la reducción de agroquímicos. Sin embargo, la variabilidad en los tipos de daño (raspadores vs. masticadores) indica que la señalización no es una panacea universal; los COVs inducidos por micorrizas pueden repeler a ciertos gremios mientras atraen a otros o son ineficaces contra especialistas. Aunque el diseño espacial fue robusto, la falta de identificación cromatográfica de los COVs específicos limita nuestra capacidad para señalar la molécula mensajera exacta. Futuras investigaciones deberían acoplar la cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC-MS) para identificar si son terpenoides o derivados de ácidos grasos (GLVs) los responsables de este efecto a 100 cm. Asimismo, es imperativo evaluar la influencia de la dirección del viento en condiciones de campo abierto, ya que la dirección de volátiles es altamente dependiente de las corrientes de aire.

VI. CONCLUSIONES

Los resultados sugieren fuertemente la hipótesis que los hongos micorrízicos indujeron cambios en *Coriandrum sativum* hasta una distancia de 200 cm, con un óptimo de promoción de crecimiento en el rango de 30 a 100 cm. Pero en forma opuesta la dureza foliar incrementó en plantas receptoras cercanas. También, se encontró que las plantas micorrizadas aisladas (control positivo) fueron más susceptibles a la herbivoría por insectos masticadores. Estos hallazgos proponen un manejo agroecológico donde la disposición estratégica de plantas micorrizadas podría

funcionar como barreras biológicas o promotoras de crecimiento para el cultivo de cilantro, reduciendo la dependencia de fertilizantes y pesticidas sintéticos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la ayuda de Shirley Amaya-Martín en el trabajo de laboratorio para la cuantificación de los arbusculos de los hongos micorrízicos.

REFERENCIAS

- [1] Camargo-Ricalde, S. L., Montañó, R. M., de la Torre-Almaráz, R., & Varela, C. (2012). Micorrizas. En A. Cruz Angón, E. D. Melgarejo, F. Camacho Rico, & K. C. Nájera Cordero (Comps.), *La biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado* (Vol. 2, pp. 150–165). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- [2] Varela, L., & Trejo, D. (2001). Los hongos micorrizógenos arbusculares como componentes de la biodiversidad del suelo en México. *Acta Zoológica Mexicana*, (Es1), 40–42.
- [3] Chaudhary, V. B., Holland, E. P., Charman-Anderson, S., Guzman, A., Bell-Dereske, L., Cheeke, T. E., Corrales, A., Duchicela, J., Egan, C., Gupta, M. M., Hannula, S. E., Hestrin, R., Hoosein, S., Kumar, A., Mhretu, G., Neuenkamp, L., Soti, P., Xie, Y., & Helgason, T. (2022). What are mycorrhizal traits? *Trends in Ecology & Evolution*, 37(7), 573–581. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2022.04.003>
- [4] Gómez, L. I. A., Portugal, V. O., Arriaga, M. R., & Alonso, R. C. (2007). Micorrizas arbusculares. *CIENCIA ergo-sum*, 14(3), 302–306.
- [5] Barrera-Berdugo, S. E. (2009). El uso de hongos micorrízicos arbusculares como una alternativa para la agricultura. *Biotechnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 7(1), 124–126.
- [6] Shrivastava, G., Ownley, B. H., Augé, R. M., Toler, H., Dee, M., Vu, A., Köllner, T. G., & Chen, F. (2015). Colonization by arbuscular mycorrhizal and endophytic fungi enhanced terpene production in tomato plants and their defense against a herbivorous insect. *Symbiosis*, 65(2), 65–74.
- [7] Martínez-Medina, A., Flors, V., Heil, M., Mauch-Mani, B., Pieterse, C. M. J., Pozo, M. J., Ton, J., van Dam, N. M., & Conrath, U. (2016). Recognizing Plant Defense Priming. *Trends in Plant Science*, 21(10), 818–822.
- [8] Song, Y., Wang, M., Zeng, R., Groten, K., & Baldwin, I. T. (2019). Priming and filtering of antiherbivore defences among *Nicotiana attenuata* plants connected by mycorrhizal networks. *Plant, Cell & Environment*, 42(11), 2945–2961.

- [8] Song, Y., Wang, M., Zeng, R., Groten, K., & Baldwin, I. T. (2019). Priming and filtering of antiherbivore defences among *Nicotiana attenuata* plants connected by mycorrhizal networks. *Plant, Cell & Environment*, 42(11), 2945–2961.
- [9] Ramadan, M. F. (Ed.). (2023). *Handbook of coriander (Coriandrum sativum): Chemistry, functionality, and applications*. CRC Press.
- [10] Rosas-Díaz, J., Vásquez-López, A., Lagunez-Rivera, L., Grana-dos-Echegoyen, C. A., & Rodríguez-Ortiz, G. (2017). Etiología de la muerte prematura del cilantro (*Coriandrum sativum* L.) en Ocotlán de Morelos, Oaxaca, México y efecto de aceites esenciales in vitro sobre el patógeno. *Interciencia*, 42(9), 592–594.
- [11] Velázquez, P. D., Paraná, A. E., & Bióticos, G. F. (2020). Identificación y caracterización de una especie del género *Alternaria* aislada de semillas de coriandro (*Coriandrum sativum*) procedentes del norte de Buenos Aires. En *Plataformas tecnológicas y comerciales para aromáticas cultivadas, nativas y medicinales* (p. 6).
- [12] Chávez, R. E. (2016). Efecto de dos sistemas de siembra en el rendimiento de *Coriandrum sativum* L. 'Santo' en Pichunchuco, Santiago de Chuco-La Libertad [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Trujillo]. Repositorio Institucional UNT.
- [13] Blog Agricultura. (2025, 5 de febrero). Estadísticas de producción de cilantro en México. <https://blogagricultura.com/estadisticas-cilantro-mexico/>
- [14] Herrera-Gorocica, A. M., Ruiz-Sánchez, E., Ballina-Gómez, H. S., Reyes-Solís, G., & Sánchez-Lázaro, A. (2022). Response of *Bemisia tabaci* Genn to the association tomato-aromatic plant. *Agrociencia*, 56(4). <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i4.2809>
- [15] Agro México. (s. f.). México, tercer productor mundial de cilantro [Video]. YouTube. Recuperado el 5 de agosto de 2026, de https://www.youtube.com/shorts/Hcfc9qx_ZVE
- [16] Comisión Nacional del Agua. (1991–2020). Información estadística climatológica. Servicio Meteorológico Nacional. <https://smn.conagua.gob.mx>
- [17] Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2012). Proyecto cultivo de cilantro: Uso de malla sombra para cultivo protegido Nunkini Calkiní, Campeche [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=60GeZ2ZJtAE>
- [18] Crawley, M. (1983). *Herbivory: The dynamics of plant-animal interactions*. Blackwell Scientific Publications.
- [19] Phillips, J. M., & Hayman, D. S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, 55(1), 158–161.
- [20] Gianinazzi, S., Gianinazzi-Pearson, V., & Trouvelot, A. (1990). Role and use of mycorrhizas in horticultural crop production. *Advances in Horticultural Science*, 4(1), 25–30.
- [21] Baldwin, I. T., Kessler, A., & Halitschke, R. (2002). Volatile signaling in plant-plant-herbivore interactions: What is real? *Current Opinion in Plant Biology*, 5(4), 351–354.
- [22] Cantúa-Ayala, J. A., Flores-Olivas, A., & Valenzuela-Soto, J. H. (2019). Compuestos orgánicos volátiles de plantas inducidos por insectos: Situación actual en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(3), 731–733.
- [23] Dicke, M., Agrawal, A. A., & Bruin, J. (2003). Plants talk, but are they deaf? *Trends in Plant Science*, 8(9), 403–405.
- [24] Ic-Miz, A. R., Ballina-Gómez, H. S., Ruiz-Sánchez, E., Medina-Dzul, K. B., Ruiz-Santiago, R. R., Pierre, J. F., Pool-Cruz, A. P., Pereyda-Pérez, C. M., & Bautista-Parra, S. G. (2023). Plants, get ready, the eating insects are coming! Prime defense of *Phaseolus vulgaris* on plant resistance and tolerance mechanisms. *Brazilian Journal of Botany*, 46(4), 1177–1185.
- [25] Sharma, E., Anand, G., & Kapoor, R. (2017). Terpenoids in plant and arbuscular mycorrhiza-reinforced defence against herbivorous insects. *Annals of Botany*, 119(5), 791–801.
- [26] Zhang, K., Wang, H., Xie, W., Niu, T., Fu, W., Zhang, X., Hao, Z., & Chen, B. (2025). Arbuscular mycorrhizal fungi and *Trichoderma harzianum* alter salicylic acid-jasmonic acid balance to suppress *Fusarium* wilt in tomato. *Frontiers in Plant Science*, 16, Artículo 1714648.
- [27] Bryant, J. P., Chapin, F. S., III, & Klein, D. R. (1983). Carbon/nutrient balance of boreal plants in relation to vertebrate herbivory. *Oikos*, 40(3), 357–368.
- [28] Real-Santillán, R., Del-Val, E., Cruz-Ortega, R., Contreras-Cornejo, H., González-Esquivel, C., & Larsen, J. (2019). Increased maize growth and P uptake promoted by arbuscular mycorrhizal fungi coincide with higher foliar herbivory and larval biomass of the Fall Armyworm *Spodoptera frugiperda*. *Mycorrhiza*, 29(6), 615–622.
- [29] Pozo, M. J., & Azcón-Aguilar, C. (2007). Unraveling mycorrhiza-induced resistance. *Current Opinion in Plant Biology*, 10(4), 393–398.



Viady Naomi Poot-Chay.

Licenciada en Biología por el TecNM,
Instituto Tecnológico de Conkal.



Addy Patricia Pool-Cruz.

Licenciada en Biología y Maestra en
Ciencias en Manejo de Recursos
Naturales Tropicales por la
Universidad Autónoma de Yucatán.



San Germán Bautista-Parra.

Ingeniero Agrónomo y Maestro en
Ciencias en Horticultura Tropical por
el TecNM, Instituto Tecnológico de
Conkal.



Helbert Mena-Martín.

Ingeniero Agrónomo y Maestro en
Ciencias en Hidrociencias por el
Colegio de Pos-graduados.



Horacio Salomón Ballina-Gómez.

Licenciado en Biología por el TecNM,
Instituto Tecnológico de Conkal y
Doctor en Ciencias por el Centro de
Investigación Científica de Yucatán.

Evaluación de un Desoxidante Libre de Cromo a Base de Ácido Nítrico y Bifluoruro de Amonio en Aleaciones de Aluminio Aeronáutico AA2024-T3 y AA7075-T6511



Guzmán Mejía José Luis¹ joseluiguzman897@gmail.com

Sánchez Jiménez Julio César¹ julio.sanchez@ciateq.mx

¹CIATEQ, Centro de Tecnología Avanzada, Querétaro, México

Abstract

2XXX- and 7XXX-series aluminum alloys are widely used in aerospace structures for their high strength-to-weight ratio, but their susceptibility to localized corrosion makes the deoxidation stage that precedes conversion coating a critical control point. Traditional deoxidizing baths rely on hexavalent chromium, whose toxicological and environmental risks have driven the search for chromium-free alternatives. This work evaluates an aqueous mixture of nitric acid (HNO_3 , 400–540 g/L) and ammonium bifluoride (NH_4HF_2 , 0,5–8,0 g/L) as a deoxidizing agent. A full 8×6 factorial design determined the deoxidation rate (tasa de desoxidado) on AA2024-T3 by gravimetric mass loss, and six representative formulations were assessed for intergranular attack (IGA) and grano terminal pitting (EGP) on AA7075-T6511 by metallographic examination at $500\times$ following ASTM F2111-22. ANOVA showed that NH_4HF_2 concentration dominates the tasa de desoxidado ($F = 305,47$, $p < 0,001$) while HNO_3 was not significant ($F = 1,05$, $p = 0,418$), with $R^2 = 97,77\%$. All selected formulations kept EGP between 0,00032 and 0,00075 in (limit 0,0010 in) and produced no detectable IGA ($<0,0001$ in; limit 0,0002 in), defining a safe operating window for a chromium-free HNO_3 – NH_4HF_2 deoxidizer.

Index Terms— aluminum deoxidation, ammonium bifluoride, chromium-free, grano terminal pitting, tasa de desoxidado, intergranular attack, nitric acid.

Resumen

Las aleaciones de aluminio de las series 2XXX y 7XXX se emplean ampliamente en estructuras aeronáuticas por su alta relación resistencia–peso, pero su susceptibilidad a la corrosión localizada hace crítica la etapa de desoxidación previa al recubrimiento de conversión. Las formulaciones tradicionales se basan en cromo hexavalente, cuyos riesgos toxicológicos y ambientales han impulsado la búsqueda de alternativas libres de cromo. En este trabajo se evalúa una mezcla acuosa de ácido nítrico (HNO_3 , 400–540 g/L) y bifluoruro de amonio (NH_4HF_2 , 0,5–8,0 g/L) como agente desoxidante. Un diseño factorial completo 8×6 determinó la tasa de desoxidación en AA2024-T3 mediante pérdida de masa gravimétrica, y seis formulaciones representativas se evaluaron por ataque intergranular (IGA) y picaduras en grano terminal (EGP) en AA7075-T6511 mediante análisis metalográfico a $500\times$ conforme a ASTM F2111-22 [15] y ASTM F2111-22 [14]. El ANOVA mostró que la concentración de NH_4HF_2 domina la tasa de desoxidado ($F = 305,47$, $p <$

0,001) mientras que el HNO_3 no resultó significativo ($F = 1,05$, $p = 0,418$), con $R^2 = 97,77\%$. Todas las formulaciones seleccionadas mantuvieron el EGP entre 0,00032 y 0,00075 in (límite 0,0010 in) y no produjeron IGA detectable ($<0,0001$ in; límite 0,0002 in), definiendo una ventana de operación segura para un desoxidante HNO_3 – NH_4HF_2 libre de cromo.

Palabras clave— ataque intergranular, bifluoruro de amonio, desoxidado de aluminio, libre de cromo, picaduras en grano terminal, tasa de desoxidado, ácido nítrico.

I. INTRODUCCIÓN

La aleación AA2024-T3, del sistema Al–Cu–Mg, se caracteriza por su alta resistencia específica y buena estabilidad térmica; sin embargo, su contenido de cobre la hace susceptible a corrosión intergranular y exfoliativa. La AA7075-T6511, endurecida por precipitación de la fase MgZn_2 , alcanza una de las resistencias más elevadas entre las aleaciones tratables térmicamente, aunque también muestra sensibilidad al ataque localizado cuando se expone a soluciones ácidas o procesos superficiales agresivos. En la fabricación de componentes aeronáuticos, la integridad superficial del aluminio es determinante para garantizar la adherencia de los recubrimientos protectores y la durabilidad frente a la corrosión, por lo que los tratamientos previos de limpieza, decapado y desoxidación constituyen etapas críticas de la preparación superficial.

La etapa de desoxidación o desmutación elimina los residuos insolubles que permanecen tras el decapado alcalino, mediante soluciones que contienen agentes oxidantes y compuestos fluorados. Históricamente, las formulaciones más eficaces se basaron en ácido crómico (H_2CrO_4) o dicromatos combinados con ácido nítrico y fluoruros; no obstante, el uso de cromo hexavalente (Cr^6) implica altos riesgos toxicológicos y ambientales, y su uso está sujeto a restricciones crecientes conforme a REACH, OSHA y NOM-052-SEMARNAT, lo que ha impulsado su sustitución progresiva por sistemas libres de cromo.

Diversas patentes han demostrado la eficacia de sistemas ácidos libres de cromo para la limpieza del aluminio, en los que el ácido nítrico aporta poder oxidante y el bifluoruro de amonio (NH_4HF_2) libera iones fluoruro de manera gradual.

Sin embargo, en todos los casos el HNO_3 se combina con un segundo agente —ácido sulfúrico, un halato oxidante con activador metálico, peróxido de hidrógeno, ácido acético o aductos de ácido mineral con urea—, de modo que la interacción específica entre el HNO_3 y el NH_4HF_2 permanece

sin caracterizar de forma aislada. Además, estos desarrollos se centran en criterios macroscópicos de limpieza y apariencia, sin abordar aspectos microestructurales ni cuantitativos del ataque intergranular [1], [2], [3], [4]. Trabajos recientes sobre desoxidación libre de cromo de AA2024-T3, como el sistema bromato de sodio-ácido nítrico [5] y la solución con sulfato férrico e inhibidores optimizada mediante diseño estadístico [6], confirman la viabilidad de sustituir el Cr(VI), pero ninguno integra simultáneamente la tasa de desoxidado con la evaluación del ataque intergranular y las picaduras en grano terminal en ambas aleaciones.

El enriquecimiento de cobre en la interfase óxido/metal por desaleado de los intermetálicos durante la preparación ácida de AA2024 [7] es precisamente el fenómeno microestructural que un desoxidante controlado debe limitar. Asimismo, la preparación superficial condiciona la formación y el desempeño de los recubrimientos de conversión posteriores sobre AA2024-T3 y AA7075-T6 [8], lo que subraya la necesidad de definir con precisión la ventana química del baño de desoxidado.

I.I. Objetivo General y Específicos

Objetivo general. Evaluar el efecto de mezclas de HNO_3 y NH_4HF_2 en la desoxidación del aluminio y su relación con el daño microestructural en aleaciones aeronáuticas AA2024-T3 y AA7075-T6511.

Objetivos específicos. Determinar las condiciones de HNO_3 y NH_4HF_2 que produzcan una tasa de desoxidación dentro del intervalo seguro de 0,15–0,40 mils/superficie·h ($\approx 3,8\text{--}10\ \mu\text{m/h}$) en la aleación AA2024-T3, y analizar el ataque intergranular (IGA $< 0,0002\text{ in}$) y las picaduras en grano terminal (EGP $< 0,001\text{ in}$) en AA7075-T6511 bajo las formulaciones seleccionadas.

II. DESARROLLO DE CONTENIDOS

A. Tasa de desoxidación

La tasa de desoxidación, es la velocidad a la que un agente químico disuelve la capa de óxido natural y los residuos intermetálicos presentes en la superficie del aluminio durante la desoxidación. Se expresa en mils/superficie·h o en $\mu\text{m/h}$ y constituye el parámetro de control más directo de la agresividad del baño. La tasa de desoxidación resulta de la competencia entre la disolución selectiva de la capa de Al_2O_3 y los precipitados intermetálicos por acción del HNO_3 y del ion fluoruro (F^-), y la pasivación parcial de la superficie por formación de complejos de aluminio solubles como AlF_4 y $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ [9]. Cuando la tasa de desoxidado es insuficiente

(< 0,15 mils/superficie·h) permanecen residuos de óxido y hollín superficial que interfieren con la adherencia del recubrimiento; por el contrario, una tasa de desoxidado excesivo (> 0,40 mils/superficie·h) puede inducir sobreataque del metal base, disolver los límites de grano y generar rugosidad no homogénea [10]. La interacción entre concentración de oxidante, concentración de fluoruro, temperatura y tiempo no es lineal: concentraciones excesivas de NH_4HF_2 pueden provocar un ataque incontrolado [11].

B. Corrosión intergranular y picaduras en grano terminal (IGA/EGP)

La corrosión intergranular (IGA) progresa preferentemente a lo largo de los límites de grano. En las aleaciones 7XXX, durante el envejecimiento se forman precipitados de fase MgZn_2 (fase η) en los límites de grano, con un potencial electroquímico más negativo que la matriz, lo que establece pares galvánicos locales que favorecen la disolución preferencial de los límites de grano [12], [13]. En la AA7075-T6511, la distribución de precipitados η - MgZn_2 junto con la zona libre de precipitados adyacente crea un gradiente electroquímico que favorece el ataque intergranular al exponerse a soluciones ácidas o fluoradas [13]. Las picaduras en grano terminal (EGP) son una manifestación de corrosión por picadura que se presenta en los extremos expuestos de productos extruidos o laminados, donde los granos quedan cortados transversalmente y la orientación longitudinal de los límites de grano queda perpendicular a la superficie, facilitando la penetración del electrolito. El criterio de aceptación industrial para EGP en AA7075-T6511, conforme a ASTM F2111-22, establece una profundidad máxima de 0,001 in ($\approx 25,4\ \mu\text{m}$).

La formación de pares galvánicos entre los precipitados η - MgZn_2 y la matriz de aluminio en aleaciones 7XXX ha sido descrita en la literatura clásica de metalurgia y corrosión del aluminio [12], [13]. La química del NH_4HF_2 en medio nítrico, con liberación gradual de iones fluoruro y formación de fluoro-complejos de aluminio, ha sido documentada en el contexto de acabados superficiales del aluminio aeronáutico [9].

III. METODOLOGÍA

El estudio adopta un enfoque experimental cuantitativo, organizado en dos etapas secuenciales. Se emplearon las aleaciones AA2024-T3 (QQ-A-250/4) y AA7075-T6511 (QQ-A-250/11), representativas de los procesos de desoxidación y conversión química de la planta. La secuencia de tratamiento comprendió limpieza alcalina,

enjuague con agua desionizada conforme a ASTM D1193 Tipo IV, desoxidado químico con HNO_3 (67 %, conforme a A-A-59105) y NH_4HF_2 grado industrial, con temperatura controlada a $20 \pm 3^\circ\text{C}$ y agitación mecánica de 500–600 rpm.

A. Etapa 1. Determinación de la tasa de desoxidado (AA2024-T3)

Se aplicó un diseño factorial completo 8×6 combinando ocho concentraciones de HNO_3 (400, 420, 440, 460, 480, 500, 520 y 540 g/L) con seis concentraciones de NH_4HF_2 (0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 4,0 y 8,0 g/L), generando 48 corridas. El tiempo de inmersión se mantuvo constante en 15 minutos. Se emplearon placas de aleación AA2024-T3 clad de $3 \times 3 \text{ in} \times 0,040 \text{ in}$, conforme a AMS-QQ-A-250/5 previamente desengrasadas y limpiadas. Cada muestra se pesó antes y después del tratamiento en balanza analítica de $\pm 0,0001 \text{ g}$, determinando la tasa de remoción de óxidos por pérdida de masa gravimétrica conforme a ASTM G1-03(2017) [16].

Aclaraciones adicionales de muestreo: (i) se procesó una probeta por combinación experimental ($n = 1$ por celda), de modo que la interacción $\text{HNO}_3 \times \text{NH}_4\text{HF}_2$ quedó agrupada en el término de error residual del ANOVA (35 grados de libertad); (ii) el espesor nominal de las placas fue de $0,040 \text{ in}$ ($1,0 \text{ mm}$) conforme AMS-QQ-A-250/5, por lo que la contribución del área de canto al área total de 18 in^2 se estima $\approx 2,6 \%$; el método gravimétrico ASTM G1-03 [16] considera despreciable el área de canto para probetas laminadas delgadas de este tipo; (iii) el protocolo de secado y pesaje consistió en enjuague con agua desionizada tras el desoxidado, secado con aire comprimido limpio y colocación de las muestras en desecador durante 15–20 min previo al pesaje final (W_f), (iv) el examen metalográfico de la Etapa 2 se realizó en laboratorio externo acreditado, tomando una micrografía a $500\times$ por probeta sobre la cara del extremo del grano previamente preparada por corte, montaje, desbaste, pulido metalográfico y ataque con reactivo de Keller modificado durante 25 s, conforme a ASTM E3, ASTM E407 y ASTM F2111-22.

$$\text{Tasa} = K \cdot (W_i - W_f) \quad (2)$$

donde:

W_i = peso inicial de la probeta antes de la inmersión en el baño desoxidante (g).

W_f = peso final de la probeta tras el enjuague con agua desionizada, secado con aire comprimido limpio y estabilización en desecador durante 15–20 min (g).

K = factor gravimétrico específico del ensayo que agrupa las constantes fijas del procedimiento (área, densidad, tiempo y

factor de conversión de unidades). Para las condiciones aquí empleadas, $K = 5,0$ (adimensional dentro del sistema de unidades adoptado).

El factor K se deriva a partir del método gravimétrico de pérdida de masa descrito en ASTM G1-03(2017) [16] y agrupa el factor de conversión de unidades $60\,000 = 1000 \text{ mils/in} \cdot 60 \text{ min/h}$ junto con las constantes fijas del ensayo (área expuesta, densidad y tiempo):

$$K = (60\,000) / (A \cdot D \cdot T) = (60\,000) / (18 \cdot 44,25 \cdot 15) = (60\,000) / (11\,947,5) \approx 5,02 \approx 5,0 \quad (3)$$

donde:

A = área nominal expuesta de la probeta considerando sus dos caras principales (in^2). Para las probetas empleadas en la Etapa 1 ($3 \times 3 \times 0,040 \text{ in}$ de AA2024-T3 clad, AMS-QQ-A-250/5), $A = 2 \cdot (3 \times 3) = 18 \text{ in}^2$. La contribución del área de canto se estima de $\approx 2,6 \%$ del área total; el método ASTM G1-03 [16] considera despreciable el área de canto para probetas laminadas delgadas de este tipo.

D = densidad de la capa efectivamente disuelta durante el desoxidado (g/in^3). Dado que la primera capa expuesta al baño corresponde al recubrimiento clad de aluminio 1230 ($\geq 99,30 \%$ Al), se emplea la densidad nominal de dicha aleación conforme a la práctica gravimétrica ASTM G1-03 [16] para ensayos sobre productos alclad: $D = 2,70 \text{ g/cm}^3$ ($0,098 \text{ lb/in}^3 \approx 44,25 \text{ g/in}^3$), valor tabulado en la Teal Sheet de The Aluminum Association [10].

T = tiempo de inmersión fijo del ensayo (min). Para todas las corridas de la Etapa 1, $T = 15 \text{ min}$.

$$\text{Tasa} = 5,0 \cdot (W_i - W_f) \quad (4)$$

El valor $K = 5,0$ coincide con el factor gravimétrico prescrito por la especificación interna del cliente OEM-180-032 para la operación del baño de desoxidado y es consistente con el método gravimétrico de pérdida de masa descrito en ASTM G1-03(2017) [16]. El redondeo de 5,02 a 5,0 introduce una subestimación sistemática menor al $0,5 \%$ en las tasas reportadas, muy por debajo de la incertidumbre del método gravimétrico y homogénea para toda la matriz experimental.

Todos los análisis estadísticos se realizaron en Minitab: modelo lineal general (GLM) para el ANOVA de dos factores con HNO_3 y NH_4HF_2 como efectos fijos, cálculo de F , p , R^2 , R^2 ajustado y R^2 predictivo, diagnóstico de residuos (Anderson–Darling, homocedasticidad e independencia) y generación de las gráficas de efectos principales, superficie de respuesta y contornos que se presentan en la Sección IV.

B. Etapa 2. Evaluación del ataque intergranular y picaduras terminales (AA7075-T6511)

A partir de los resultados de la Etapa 1 se seleccionaron seis condiciones dentro del intervalo controlado de tasa de desoxidado. Cada formulación se evaluó a dos tiempos de exposición (60 y 180 minutos), generando 12 corridas. Se emplearon placas de aleación AA7075-T6511 (QQ-A-200/11) de $1,0 \times 2,0 \times 0,250$ in, con la dirección larga transversal (LT) del grano paralela al lado de 2 in; las probetas se procesaron por inmersión en su condición de suministro superficial (sin pulido previo) y, tras el tratamiento, únicamente la cara del extremo del grano (ST, $1,0 \times 0,250$ in) se preparó metalográficamente (pulida hasta $Ra \leq 32 \mu\text{in} \approx 0,81 \mu\text{m}$) para su observación al microscopio acondicionadas por limpieza y desengrase. Las probetas se prepararon mediante corte transversal para exponer la microestructura del extremo de extrusión (grano terminal), montadas en resina y pulidas hasta obtener una superficie libre de rayas, con limpieza ultrasónica entre operaciones. El revelado metalográfico se realizó con reactivo de Keller modificado (2,5 mL HNO_3 al 70 %, 1,5 mL HCl concentrado, 1,0 mL HF al 48 % y 95 mL de agua desionizada) durante aproximadamente 25 segundos, conforme a ASTM E407. La observación se efectuó por microscopía metalúrgica a $500\times$ con retícula filar graduada, midiendo la profundidad máxima de EGP y registrando la presencia o ausencia de IGA, conforme a ASTM F2111-22. Los criterios de aceptación fueron $\text{IGA} < 0,0002$ in y $\text{EGP} < 0,001$ in.

IV. RESULTADOS

A. Determinación de la tasa de desoxidado (Etapa 1)

Se ejecutaron las 48 corridas del diseño factorial completo 8×6 (ocho concentraciones de HNO_3 de 400 a 540 g/L y seis concentraciones de NH_4HF_2 de 0,5 a 8,0 g/L), con una réplica por combinación y 15 min de inmersión. La Tabla I presenta la matriz experimental completa con los pesos iniciales y finales de cada probeta y la tasa de desoxidación resultante, expresada en mils/superficie·h. Los valores de tasa de desoxidación variaron desde 0,2185 mils/superficie·h (400 g/L HNO_3 ; 0,5 g/L NH_4HF_2) hasta 1,1660 mils/superficie·h (440 g/L HNO_3 ; 8,0 g/L NH_4HF_2), abarcando poco más de un orden de magnitud dentro del dominio experimental.

Tabla I. Matriz experimental del diseño factorial completo 8×6 para la determinación de la tasa de desoxidación en el sistema HNO_3 – NH_4HF_2 sobre AA2024-T3.

Corrida	HNO_3 (g/L)	NH_4HF_2 (g/L)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Tasa de desoxidado (mils/superficie·h)
1	400	0,5	16,1677	16,1240	0,2185
2	400	1,0	16,1945	16,1241	0,3520
3	400	1,5	16,2048	16,1001	0,5235
4	400	2,0	16,0385	15,9405	0,4900
5	400	4,0	16,1213	15,9674	0,7695
6	400	8,0	16,0470	15,8182	1,1440
7	420	0,5	16,1771	16,1147	0,3120
8	420	1,0	16,0617	15,9898	0,3595
9	420	1,5	16,1097	15,9932	0,5825
10	420	2,0	16,1562	16,0356	0,6030
11	420	4,0	15,8885	15,7422	0,7315
12	420	8,0	16,0906	15,8814	1,0460
13	440	0,5	16,1873	16,1372	0,2505

Corrida	HNO_3 (g/L)	NH_4HF_2 (g/L)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Tasa de desoxidado (mils/superficie·h)
14	440	1,0	16,1393	16,0611	0,3910
15	440	1,5	16,1919	16,1060	0,4295
16	440	2,0	16,1733	16,0650	0,5415
17	440	4,0	16,1109	15,9607	0,7510
18	440	8,0	16,0662	15,8330	1,1660
19	460	0,5	16,0393	15,9901	0,2460
20	460	1,0	16,1232	16,0573	0,3295
21	460	1,5	16,0630	15,9688	0,4710
22	460	2,0	16,1956	16,0791	0,5825
23	460	4,0	16,2001	16,0427	0,7870
24	460	8,0	16,0911	15,8819	1,0460
25	480	0,5	16,2069	16,1563	0,2530
26	480	1,0	16,3238	16,2541	0,3485
27	480	1,5	16,1595	16,0806	0,3945
28	480	2,0	16,1595	16,0492	0,5515
29	480	4,0	16,2287	16,0747	0,7700
30	480	8,0	16,0839	15,8841	0,9990
31	500	0,5	16,0497	15,9985	0,2560
32	500	1,0	15,9964	15,9317	0,3235
33	500	1,5	16,0827	16,0044	0,3915
34	500	2,0	15,9607	15,8515	0,5460
35	500	4,0	16,1011	15,9407	0,8020
36	500	8,0	16,0496	15,8450	1,0230
37	520	0,5	16,0623	16,0072	0,2755
38	520	1,0	16,2301	16,1620	0,3405
39	520	1,5	16,1006	16,0209	0,3985
40	520	2,0	16,1081	15,9901	0,5900
41	520	4,0	16,0569	15,9197	0,6860
42	520	8,0	16,0912	15,8924	0,9940
43	540	0,5	16,0730	16,0223	0,2535
44	540	1,0	16,0833	16,0203	0,3150
45	540	1,5	16,1304	16,0274	0,5150
46	540	2,0	16,0247	15,9124	0,5615
47	540	4,0	15,9847	15,8245	0,8010
48	540	8,0	16,1124	15,9117	1,0035

El análisis de varianza mostró que la concentración de NH_4HF_2 tuvo un efecto estadísticamente significativo sobre la tasa de desoxidación ($F = 305,47$, $p < 0,001$), mientras que la concentración de HNO_3 no resultó significativa dentro del intervalo evaluado ($F = 1,05$, $p = 0,418$). En el rango de 400–540 g/L, la variación del ácido nítrico no modifica de manera apreciable la velocidad de ataque, en contraste con el bifluoruro de amonio, que controla de forma dominante la intensidad del desoxidado. El modelo presentó un ajuste excelente, con $R^2 = 97,77\%$, R^2 ajustado = $97,01\%$ y R^2 predictivo = $95,81\%$; las gráficas de residuos confirmaron los supuestos de normalidad, homocedasticidad e independencia.

Al haberse ejecutado una réplica por combinación ($n = 1$ por celda), la interacción $\text{HNO}_3 \times \text{NH}_4\text{HF}_2$ fue agrupada dentro del término de error residual (35 grados de libertad) para permitir la estimación de F y p de los efectos principales. La Tabla II resume el análisis de varianza completo del modelo lineal general. Debido a que el diseño empleó una única corrida por celda ($n = 1$), la interacción $\text{HNO}_3 \times \text{NH}_4\text{HF}_2$ no pudo estimarse de forma independiente y quedó agrupada en el término de error residual (35 grados de libertad); la magnitud del cuadrado medio del error ($\text{CM} = 0,00422$) y el elevado ajuste del modelo ($R^2 = 97,77\%$) indican que dicha interacción, de existir, es de segundo orden respecto al efecto principal del NH_4HF_2 .

Tabla II. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo lineal general para la tasa de desoxidación en función de la concentración de HNO_3 y NH_4HF_2 en AA2024-T3.

Fuente	GL	SC	CM	F	p
HNO_3	7	0,02176	0,00311	1,05	0,418
NH_4HF_2	5	6,44832	1,28966	305,47	<0,001
Error	35	0,14779	0,00422	—	—
Total	47	6,61787	—	—	—
$R^2 = 97,77\%$; R^2 ajustado = $97,01\%$; R^2 predictivo = $95,81\%$					

El análisis de residuos del modelo (gráficas de residuos vs. valores ajustados, histograma y probabilidad normal generadas en Minitab) confirmó los supuestos de normalidad (prueba de Anderson–Darling, $p > 0,05$), homocedasticidad e independencia; no se detectaron patrones sistemáticos ni valores atípicos influyentes.

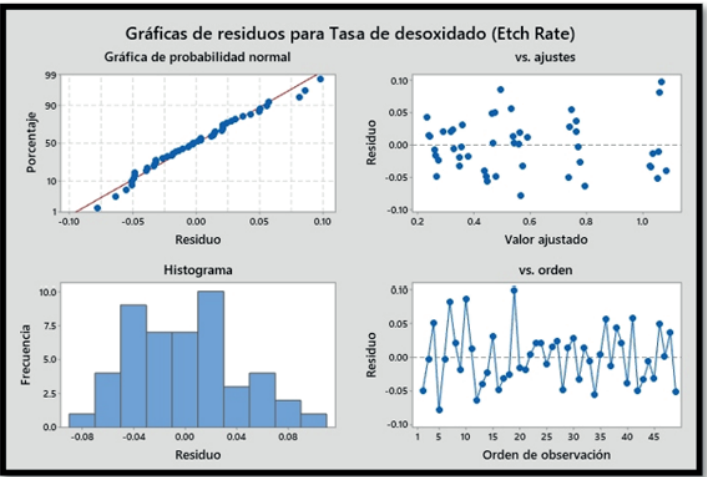


Fig. 1. Gráficas de residuos obtenidas en Minitab para la tasa de desoxidación: probabilidad normal, residuos vs. valores ajustados, histograma y residuos vs. orden de observación.

El diagnóstico de residuos verifica los supuestos del modelo lineal general (Fig. 1): en la gráfica de probabilidad normal, los residuos siguen la línea de referencia sin desviación importante, sugiriendo normalidad razonable; en la gráfica de residuos frente a valores ajustados, los puntos se distribuyen aleatoriamente alrededor de cero sin tendencia sistemática, indicando ausencia de heterocedasticidad marcada; el histograma exhibe una distribución aproximadamente centrada; y la gráfica de residuos frente al orden de observación no presenta patrones sistemáticos, evidenciando independencia razonable de los residuos durante la secuencia experimental.

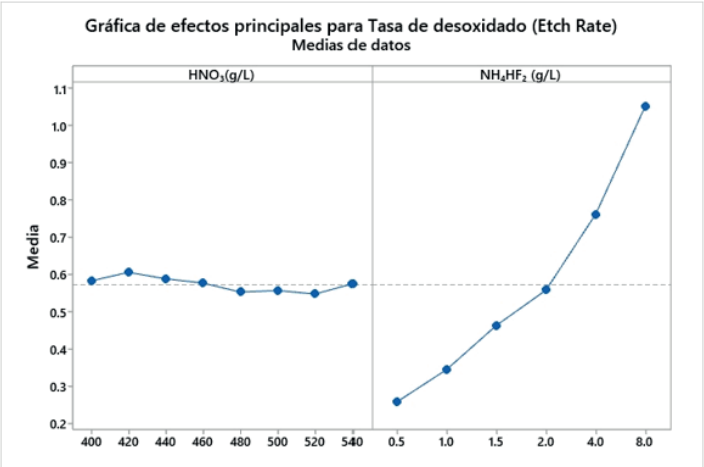


Fig. 2. Gráfica de efectos principales para la tasa de desoxidado, evaluando el efecto de la concentración de HNO_3 y NH_4HF_2 sobre la tasa de desoxidado de la aleación AA2024-T3.

La gráfica de efectos principales muestra que la media de la tasa de desoxidado se mantiene prácticamente constante al variar el HNO_3 de 400 a 540 g/L, mientras que aumenta de manera marcada y casi monótona al incrementar la concentración de NH_4HF_2 de 0,5 a 8,0 g/L. Los niveles bajos de bifluoruro (0,5–1,0 g/L) se asocian con valores de tasa de desoxidado cercanos al límite inferior de la ventana segura, aproximadamente 0,25–0,35 mils/superficie·h ($\approx 6\text{--}9\text{ }\mu\text{m/h}$), mientras que los niveles más elevados (4,0–8,0 g/L) generan tasas superiores a 0,7–1,0 mils/superficie·h ($\approx 18\text{--}25\text{ }\mu\text{m/h}$), indicativas de un ataque considerablemente más agresivo.

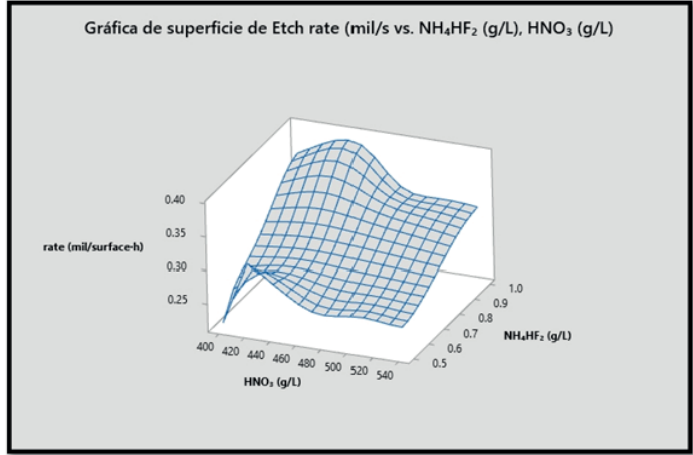


Fig. 3. Gráfica de superficie de respuesta de la tasa de desoxidado en función de la concentración de HNO_3 (400–540 g/L) y NH_4HF_2 (0,5–1,0 g/L) para la aleación AA2024-T3 a 15 min de exposición.

La superficie de respuesta presenta una forma no lineal, con una zona de valores máximos de tasa de desoxidación ($\approx 0,40$ mils/superficie·h, $\approx 10\text{ }\mu\text{m/h}$) en la región de HNO_3 entre 440 y 480 g/L combinada con los niveles más altos del subdominio operativo evaluado (hasta 1,0 g/L). Los valores mínimos ($\approx 0,25$ mils/superficie·h, $\approx 6,4\text{ }\mu\text{m/h}$) se registran en las condiciones de menor concentración de NH_4HF_2 (0,5 g/L), independientemente del nivel de HNO_3 , confirmando que el bifluoruro de amonio es el factor de mayor influencia sobre la velocidad de remoción del óxido superficial.

Nota metodológica: Las Figs. 3 y 4 restringen deliberadamente el eje de NH_4HF_2 al intervalo 0,5–1,0 g/L, que corresponde a la ventana operativa segura identificada en la Fig. 2 (tasa de desoxidación dentro de 0,15–0,40 mils/superficie·h). El diseño factorial cubrió el intervalo completo 0,5–8,0 g/L reportado en la Tabla I, pero los niveles $\geq 1,5$ g/L generan tasas de desoxidado superiores al criterio de aceptación industrial, por lo que se excluyen de las superficies de respuesta y contornos por no ser de interés operativo. Por esta razón, las Figs. 2 y 3 se presentan

restringidas al subdominio operativo $\text{NH}_4\text{HF}_2 = 0,5\text{--}1,0$ g/L, donde se cumple el criterio de aceptación industrial (tasa de desoxidado $\leq 0,40$ mils/superficie·h).

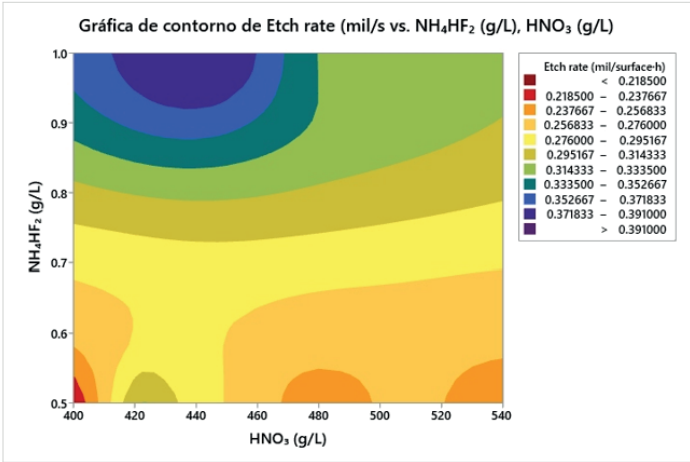


Fig. 4. Gráfica de contorno de la tasa de desoxidación en función de la concentración de HNO_3 (400–540 g/L) y NH_4HF_2 (0,5–1,0 g/L) para la aleación AA2024-T3 a 15 min de exposición.

El mapa de contornos, donde cada intervalo de color representa rangos de tasa de desoxidado desde aproximadamente 0,22 hasta 0,39 mils/superficie·h ($\approx 5,6\text{--}9,9\text{ }\mu\text{m/h}$), permite identificar visualmente el dominio de concentraciones que mantiene la tasa de desoxidado dentro del rango objetivo definido para el proceso.

B. Evaluación de IGA y EGP (Etapa 2)

A partir de los resultados de la Etapa 1 se seleccionaron seis condiciones representativas (Tabla III) para su evaluación en la Etapa 2, correspondientes a combinaciones de HNO_3 y NH_4HF_2 con tasas de desoxidado dentro de un intervalo controlado, cada una evaluada a 60 y 180 minutos.

Tabla III. Condiciones seleccionadas de la Etapa 1 para su evaluación en la Etapa 2.

ID	Orden	HNO_3 (g/L)	NH_4HF_2 (g/L)	Tasa de desoxidado (mils/superficie·h)
C1	1	400	0,5	0,2185
C2	7	420	0,5	0,3120
C3	14	440	1,0	0,3910
C4	25	480	0,5	0,2530
C5	32	500	1,0	0,3235
C6	43	540	0,5	0,2535

La Tabla IV resume la profundidad máxima de EGP y la presencia de IGA obtenidas en las probetas de AA7075-T6511. En todos los casos la profundidad máxima de EGP se encontró en el rango de 0,00032 a 0,00075 in, valores inferiores al límite de 0,0010 in. El ataque intergranular no fue detectable en ninguna sección evaluada, reportándose en todos los especímenes como no detectado (<0,0001 in), es decir, al menos un orden de magnitud por debajo del límite de 0,0002 in.

Nota: Los valores de EGP corresponden al máximo observado por probeta en una micrografía a 500× tomada sobre la cara del extremo del grano (ST) previamente preparada metalográficamente, conforme a ASTM F2111-22. IGA se reporta como 'no detectado (<0,0001 in)' cuando ninguna sección examinada presentó ataque intergranular medible al aumento de trabajo.

Tabla IV. Profundidad máxima de EGP y presencia de IGA en AA7075-T6511 tras el desoxidado HNO₃-NH₄HF₂ (Etapa 2).

Muestra	Tiempo (min)	EGP (in)	IGA (in)
E2-C1-T60	60	0,00043	< 0,0001 (no det.)
E2-C1-T180	180	0,00042	< 0,0001 (no det.)
E2-C2-T60	60	0,00033	< 0,0001 (no det.)
E2-C2-T180	180	0,00075	< 0,0001 (no det.)
E2-C3-T60	60	0,00044	< 0,0001 (no det.)
E2-C3-T180	180	0,00040	< 0,0001 (no det.)
E2-C4-T60	60	0,00038	< 0,0001 (no det.)
E2-C4-T180	180	0,00051	< 0,0001 (no det.)
E2-C5-T60	60	0,00059	< 0,0001 (no det.)
E2-C5-T180	180	0,00049	< 0,0001 (no det.)
E2-C6-T60	60	0,00032	< 0,0001 (no det.)
E2-C6-T180	180	0,00040	< 0,0001 (no det.)

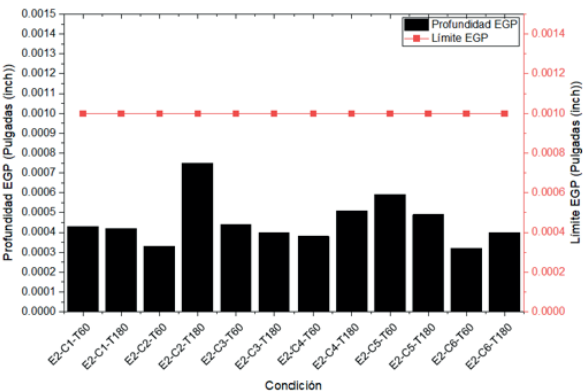


Fig. 5. Comparación descriptiva de la profundidad de picaduras en grano terminal (EGP) medida en las diferentes condiciones formulación-tiempo, respecto al límite máximo establecido de 0,0010 pulgadas.

En este contexto, ASTM F2111-22 [14] constituye el criterio cuantitativo de aceptación para IGA y EGP en aleaciones de aluminio expuestas a procesos químicos aeronáuticos; la preparación y ataque metalográfico se realizaron conforme a ASTM E3 y ASTM E407, y el redondeo de las profundidades medidas siguió el método de ASTM E29 [15]. No se aplicó ningún ensayo de susceptibilidad general por inmersión externa, ya que el propósito de la Etapa 2 fue evaluar el daño residual producido por el propio desoxidante HNO₃-NH₄HF₂ sobre las probetas AA7075-T6511.

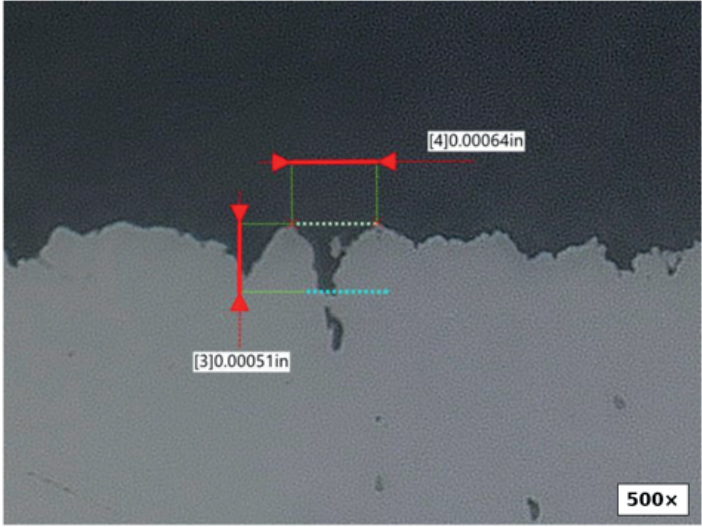


Fig. 6. Micrografía en corte transversal de la aleación AA7075-T6511 después del ensayo, mostrando la medición de la profundidad de picaduras en grano terminal en un sitio representativo de la sección evaluada.

C. Discusión ampliada

Los resultados obtenidos son consistentes con la literatura previa de desoxidantes libres de cromo. Harvey et al. [5] caracterizaron el sistema NaBrO₃-HNO₃ sobre AA2024-T3 a 20–60 °C y describieron su comportamiento como desoxidante de baja tasa de ataque a temperaturas ≤ 40 °C, condición coherente con la ventana operativa aquí obtenida (0,22–0,39 mils/superficie·h). Li et al. [6] optimizaron mediante diseño estadístico una solución libre de cromo para el desoxidado de aleaciones de aluminio aeronáutico, aunque su formulación resulta más compleja al incorporar múltiples aditivos. Frente a estos sistemas, la mezcla binaria HNO₃-NH₄HF₂ aquí caracterizada tiene la ventaja operativa de emplear solo dos componentes activos y de no requerir agentes oxidantes adicionales (halatos o peróxidos). Respecto al mecanismo, la no significancia estadística del HNO₃ en el intervalo 400–540 g/L (F = 1,05, p = 0,418) indica que, a esas concentraciones, el ácido nítrico se encuentra en exceso oxidante/pasivante y su papel se limita a mantener el

potencial redox del baño y la solubilidad de los productos de Al^3+ . El control efectivo del ataque lo ejerce el ion fluoruro liberado por el NH_4HF_2 , que en medio ácido establece el equilibrio de especiación $\text{HF} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{F}^-$ ($\text{pK}_a \approx 3,17$) y forma complejos solubles del tipo AlF_3 , principalmente AlF_4^- y AlF_6^{3-} [9]. Esta interpretación es congruente con el enriquecimiento de cobre en la interfase óxido/metal reportado por Trinidad et al. [7] durante la preparación ácida de AA2024, fenómeno que un desoxidante controlado debe limitar y que en las formulaciones aquí seleccionadas no derivó en daño detectable de IGA.

V. CONCLUSIONES

El análisis de varianza de la Etapa 1 demostró que el bifluoruro de amonio (NH_4HF_2) es la variable dominante de la tasa de desoxidado en AA2024-T3 ($F = 305,47$; $p < 0,001$), mientras que la concentración de ácido nítrico no resultó significativa ($F = 1,05$; $p = 0,418$) en el intervalo evaluado.

El modelo estadístico obtenido presentó un ajuste elevado ($R^2 = 97,77\%$; R^2 ajustado = $97,01\%$; R^2 predictivo = $95,81\%$), lo que confirma su capacidad para predecir la tasa de desoxidado dentro del rango objetivo de 0,15–0,40 mils/superficie/hora.

En la Etapa 2, ninguna de las seis formulaciones evaluadas del sistema $\text{HNO}_3\text{--NH}_4\text{HF}_2$ generó daño metalúrgico inaceptable en la aleación AA7075-T6511: las profundidades máximas de EGP se mantuvieron entre 0,00032 y 0,00075 in, por debajo del límite de 0,0010 in.

El ataque intergranular (IGA) no fue detectable ($<0,0001$ in) en ninguna de las secciones evaluadas, incluso en los tiempos de exposición más severos de 180 minutos, cumpliendo con los criterios de ASTM F2111-22 [14] [15].

El control del proceso puede lograrse ajustando la concentración de NH_4HF_2 en niveles bajos (0,5–1,0 g/L), lo que ofrece un criterio práctico y robusto para la operación industrial del baño.

El sistema binario $\text{HNO}_3\text{--NH}_4\text{HF}_2$ se posiciona como una alternativa técnicamente viable a los desoxidantes tradicionales basados en cromo hexavalente, aportando datos experimentales cuantitativos de la tasa de desoxidado y del daño intergranular para las dos aleaciones aeronáuticas de referencia.

VI. LIMITACIONES Y TRABAJO FUTURO

Este estudio caracterizó el sistema binario $\text{HNO}_3\text{--NH}_4\text{HF}_2$ en condiciones de laboratorio a $20 \pm 3^\circ\text{C}$, con réplica única por celda y sin control del envejecimiento del baño. Las líneas de trabajo futuro identificadas son: (i) estudiar el

envejecimiento del baño desoxidante en función de la carga de aluminio disuelto y de la vida útil operativa; (ii) evaluar el desempeño anticorrosivo del sistema desoxidante en combinación con recubrimientos de conversión libres de cromo hexavalente (base circonio, titanio-circonio o tierras raras) mediante niebla salina neutra según ASTM B117 y espectroscopía de impedancia electroquímica; (iii) escalar el proceso a operación industrial continua con control estadístico y monitoreo de la deriva composicional del baño.

REFERENCIAS

- [1] R. C. Loch, «Non-chromated deoxidizer», U.S. Patent 4,614,607 A, cesionario: The Boeing Company, sep. 30, 1986.
- [2] M. E. Tadros, «Nonchromate deoxidizer for aluminum alloys», U.S. Patent 4,883,541 A, cesionario: Martin Marietta Corp., nov. 28, 1989.
- [3] R. L. Clifton, «Method for desmutting aluminum alloys having a highly reflective surface», U.S. Patent 5,417,819 A, cesionario: Ionics, Inc., may. 23, 1995.
- [4] N. Ando, T. Sasaki y K. Yoshida, «Cleaning composition for metal articles», WO Patent 2014/092756 A1, cesionario: Henkel AG & Co. KGaA, jun. 19, 2014.
- [5] T. G. Harvey et al., «Non-chromate deoxidation of AA2024-T3: Sodium bromate-nitric acid (20–60 °C),» Appl. Surf. Sci., vol. 254, pp. 3562–3575, 2008, doi: 10.1016/j.apsusc.2007.11.061. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.11.061>
- [6] D. Li et al., «Chemical deoxidation with Cr-free solution for less-polluting pretreatment of aviation aluminium alloy,» Corros. Eng. Sci. Technol., vol. 60, no. 1, pp. 3–12, 2025, doi: 10.1177/1478422X241270134. <https://doi.org/10.1177/1478422X241270134>
- [7] C. Trinidad et al., «Effect of surface preparation treatments on copper enrichment on 2024 aluminium alloy surface,» Appl. Surf. Sci., vol. 560, art. 149991, 2021, doi: 10.1016/j.apsusc.2021.149991. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.149991>
- [8] J. J. Alba-Galván et al., «Application of commercial surface pretreatments on the formation of cerium conversion coating (CeCC) over high-strength aluminum alloys 2024-T3 and 7075-T6,» Metals, vol. 11, no. 6, art. 930, 2021, doi: 10.3390/met11060930. <https://doi.org/10.3390/met11060930>
- [9] W. J. Fullen and J. Deheck, «Aluminum surface finishing corrosion causes and troubleshooting,» NASF Surf. Technol. White Papers, vol. 79, no. 3, pp. 1–15, 2014.

10] The Aluminum Association, International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys (Teal Sheets). Arlington, VA, USA: The Aluminum Association, 2015 (revisión 2021). [En línea]. Disponible: <https://www.aluminum.org/sites/default/files/2021-11/TealSheet.pdf>

[11] M. Eslami, V. Pachchigar, M. Sankaran, and D. V. Krogstad, "Critical influence of chemical pretreatments on the deposition and effectiveness of Zr-based conversion coating on AA2024-T3 aluminum alloy," Appl. Surf. Sci., vol. 697, art. 163018, 2025, doi: 10.1016/j.apsusc.2025.163018. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2025.163018>

[12] J. R. Davis, Alloying: Understanding the Basics. Materials Park, OH: ASM International, 2001.

[13] C. Vargel, Corrosion of Aluminium. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2004.

[14] Standard Practice for Measuring Intergranular Attack or End Grain Pitting on Metals Caused by Aircraft Chemical Processes, ASTM F2111-22, ASTM International, 2022.

[15] Standard Practice for Using Significant Digits in Test Data to Determine Conformance with Specifications, ASTM E29-13(2019), ASTM International, 2019, doi: 10.1520/E0029-13R19.

[16] Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens, ASTM G1-03(2017)e1, ASTM International, 2017, doi: 10.1520/G0001-03R17E01. <https://doi.org/10.1520/G0001-03R17E01>



José Luis Guzmán Mejía

es ingeniero químico y estudiante de la Maestría en Manufactura Avanzada en CIATEQ, Centro de Tecnología Avanzada, Querétaro, México. Se especializa en procesos especiales de la industria aeroespacial: soldadura, ensayos no destructivos (RT, FPI) y

tratamientos superficiales. Su trabajo se enfoca en el desarrollo y validación de procesos químicos libres de cromo hexavalente, el análisis estadístico mediante diseño de experimentos y el cumplimiento de estándares NADCAP y AS9100.



Julio César Sánchez Jiménez

es Ingeniero Mecánico y Maestro en Diseño y Desarrollo de Sistemas Mecánicos. Actualmente se desempeña como Líder de Especialidad en la Gerencia de Máquinas Especiales de CIATEQ, donde a

ha dirigido proyectos de desarrollo tecnológico vinculados con maquinaria, movilidad, reciclaje y atención a emergencias. Cuenta con experiencia en dirección y revisión de tesis, publicaciones y registros de propiedad intelectual.

Análisis De Fallas Mediante Herramientas SPC En La Producción Del Empaque 1 En Una Empresa De Cartón



López Arteaga Mónica Paulina¹ monica.la@saltillo.tecnm.mx

Berlanga Sierra Erick Alejandro¹ L22050182@saltillo.tecnm.mx

Calvillo Pinales Francisco Omar¹ L22050187@saltillo.tecnm.mx

¹Instituto Tecnológico de Saltillo, Coahuila, México

Abstract:

This study applies Statistical Process Control (SPC) tools to identify and prioritize the main causes of defects in the production process of “Empaque 1” in a corrugated packaging company. A quantitative, explanatory, non-experimental cross-sectional design was adopted, supported by a structured 6M questionnaire and process observation. An Ishikawa diagram was used to classify potential causes, and a Pareto analysis based on weighted impact was developed through a prioritization matrix (Likert scale 1–5) due to the absence of historical defect records by category. Results indicate that machinery and material-related factors account for 61% of the estimated weighted impact, highlighting the predominance of technical causes within the production system. The integrated application of SPC tools enabled structured prioritization and provided a data-driven basis for decision-making aimed at process improvement and defect reduction.

Resumen:

El presente estudio aplica herramientas de Control Estadístico de Procesos (SPC) para identificar y priorizar las principales causas de fallas en la producción del Empaque 1 en una empresa de cartón corrugado. Se adoptó un diseño cuantitativo, explicativo, no experimental de tipo transversal, apoyado en un cuestionario estructurado bajo el modelo 6M y observación del proceso productivo. Se elaboró un diagrama de Ishikawa para clasificar las causas potenciales y un análisis de Pareto basado en impacto ponderado mediante una matriz de priorización (escala Likert 1–5), debido a la ausencia de registros históricos de defectos clasificados por categoría. Los resultados muestran que los factores asociados a maquinaria y materiales concentran el 61% del impacto ponderado estimado, evidenciando la predominancia de causas técnicas dentro del sistema productivo. La aplicación integrada de herramientas SPC permitió establecer una priorización estructurada y fundamentar la toma de decisiones orientadas a la mejora del proceso y la reducción de defectos.

I. INTRODUCCIÓN

La industria del cartón enfrenta altos estándares de calidad debido a su participación en sectores industriales exigentes, como el automotriz. En este contexto, una empresa con más

Durante su proceso de producción —que incluye laminado, grapado y armado— se detectaron defectos como exceso de grapas, deslaminado, descuadre estructural y colapso al estibar, generando reclamaciones directas por parte del cliente y afectando la reputación organizacional.

El análisis preliminar evidenció deficiencias en la coordinación entre producción y calidad, ausencia de estandarización operativa y limitaciones en el control del proceso. Dado el entorno competitivo en el que opera la empresa, resulta indispensable fortalecer la disciplina en la gestión productiva mediante herramientas estadísticas que permitan monitorear la variabilidad y reducir defectos.

En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo aplicar herramientas de Control Estadístico de Procesos (SPC) para identificar y cuantificar las causas principales de las fallas en el Empaque 1, con el propósito de mejorar la calidad del producto y optimizar el desempeño operativo.

Se plantea como hipótesis que la aplicación sistemática de herramientas SPC permitirá identificar y priorizar las causas críticas del proceso productivo, facilitando la implementación de acciones de mejora orientadas a la reducción de defectos.

II. OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICOS

Objetivo general

Indagar las causas que originan las fallas en el número de partes 1 en la empresa de empaque.

Objetivos específicos

- Obtener evidencias estadísticas de la ocurrencia de las fallas con la aplicación de herramientas de (SPC) en el número de partes 1 en la empresa de empaque.
- Señalar las causas de mayor relevancia para posibles mejoras al proceso de producción del empaque en el número de parte 1.
- Proponer mejoras al proceso de producción en el empaque 1 de la empresa.

III. JUSTIFICACIÓN

La realización de esta investigación contribuirá al fortalecimiento de las competencias en Control Estadístico de Procesos (SPC) de los investigadores y permitirá identificar con mayor claridad las causas principales de los defectos y los puntos críticos del proceso que requieren atención inmediata.

En toda organización cuyo objetivo es ofrecer productos o servicios de calidad, resulta indispensable asegurar el cumplimiento de los estándares establecidos y de las expectativas del cliente. En este sentido, el análisis del proceso mediante herramientas y software especializado en SPC adquiere relevancia para garantizar un control sistemático y disciplinado de la producción.

El estudio permitirá identificar las fallas presentes en el proceso de producción de empaques de cartón mediante datos específicos y cuantificables, facilitando la detección oportuna de la causa raíz antes de la entrega del producto al cliente.

Asimismo, el uso de herramientas estadísticas contribuirá a la reducción de productos no conformes, promoverá la capacitación del personal para la detección temprana de problemas y fortalecerá la imagen y reputación de la empresa.

IV. MARCO TEÓRICO

Antecedentes del Uso del SPC en la Industria

Diversos estudios han evidenciado la relevancia del Control Estadístico de Procesos (SPC) en entornos manufactureros. En una investigación realizada en empresas del Valle de Toluca, se identificó que, pese a dificultades iniciales en la implementación de software especializado, los beneficios operativos y administrativos derivados del uso del SPC superaron las limitaciones iniciales [1]. Asimismo, se observó una brecha significativa entre empresas grandes y pequeñas en cuanto al nivel de adopción de herramientas estadísticas, siendo las organizaciones con mayor estructura tecnológica las que alcanzaron mejores niveles de control y competitividad.

En el sector del cartón, investigaciones enfocadas en la producción de papel corrugado demostraron que la aplicación de herramientas cuantitativas permitió mejorar la detección de defectos y fortalecer los mecanismos de control de calidad [2]. De igual manera, la implementación de metodologías estructuradas de mejora continua en empresas de empaques de cartón ha mostrado reducciones significativas en desperdicios y mejoras estadísticamente comprobables en el desempeño productivo [3].

Estos antecedentes confirman que la aplicación disciplinada de herramientas estadísticas contribuye directamente a la estabilidad del proceso y a la reducción de defectos.

Importancia de la Calidad en los Procesos Productivos

La calidad en los sistemas productivos depende del equilibrio entre eficiencia y eficacia. Estudios recientes señalan que la adecuada gestión de factores productivos permite optimizar recursos y reducir desperdicios, garantizando el cumplimiento de objetivos organizacionales [4].

Asimismo, el mantenimiento preventivo alineado con producción influye directamente en la confiabilidad operativa y en la calidad final del producto [5]. En industrias donde el cumplimiento de especificaciones técnicas es crítico, la ausencia de control sistemático incrementa el riesgo de no conformidades y afecta la satisfacción del cliente.

Herramientas Estadísticas para el Control y Mejora de Procesos

Six Sigma se ha consolidado como una metodología orientada a la reducción de variabilidad y eliminación de desperdicios en procesos industriales [6]. Dentro de este enfoque, el SPC permite monitorear continuamente el desempeño del proceso, identificar desviaciones tempranas y establecer acciones correctivas basadas en datos objetivos [7].

En el presente estudio, el uso de herramientas como histogramas, gráficas de control, diagrama de Ishikawa y diagrama de Pareto permite estructurar el análisis del Empaque 1 bajo un enfoque cuantitativo, facilitando la identificación de causas críticas.

Diagrama de Ishikawa

El diagrama de Ishikawa constituye una herramienta para la identificación estructurada de causas potenciales mediante el modelo de las 6M: máquina, método, material, medición, medio ambiente y mano de obra. Su aplicación permite organizar y clasificar factores que influyen en la calidad del producto, facilitando la identificación de la causa raíz [8].

En el análisis del Empaque 1, esta herramienta permite visualizar la interacción entre variables del proceso productivo y establecer una base técnica para la priorización de mejoras.

Diagrama de Pareto

El principio de Pareto establece que un número reducido de causas genera la mayor proporción de los problemas dentro de un sistema productivo [9]. Esta herramienta permite distinguir entre causas vitales y triviales, facilitando la asignación eficiente de recursos en procesos de mejora.

En el contexto del Empaque 1, el análisis de Pareto permite identificar las categorías con mayor incidencia en la generación de defectos, fortaleciendo la toma de decisiones basada en evidencia cuantificable.

V. METODOLOGÍA

Enfoque y Diseño de Investigación

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo con alcance explicativo, orientado a identificar y analizar las causas que originan fallas en el proceso productivo del Empaque 1. Se adoptó un diseño no experimental de tipo transversal, ya que no se realizó manipulación de variables ni asignación aleatoria de tratamientos, sino que se analizaron las condiciones existentes del proceso en un periodo específico.

El enfoque cuantitativo permitió medir la incidencia percibida de fallas y evaluar la contribución relativa de los factores asociados al proceso productivo, tales como fallas de maquinaria, materiales defectuosos y variaciones operativas.

Población y Muestra

La población estuvo conformada por 11 trabajadores del área de Empaque 1 de la empresa analizada. Debido al tamaño reducido de la población, se trabajó con la totalidad de los integrantes, constituyendo así un estudio censal.

Variables de Estudio

Se consideraron las siguientes variables:

- Variable dependiente: Número de defectos en el producto final del Empaque 1.
- Variable independiente: Factores asociados al proceso productivo clasificados bajo el modelo de las 6M (máquina, método, material, medición, medio ambiente y mano de obra).

Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Para la obtención de información se emplearon las siguientes técnicas:

1. Cuestionario estructurado bajo el modelo 6M, aplicado al personal operativo del área.
2. Entrevistas directas para complementar la información obtenida.
3. Revisión de registros productivos internos proporcionados por el área de calidad.
4. Observación directa del proceso productivo.

El cuestionario fue diseñado con preguntas específicas orientadas a identificar fallas recurrentes, problemas mecánicos, errores humanos y condiciones del entorno laboral. Las respuestas fueron registradas y posteriormente organizadas para su análisis estadístico.

Procedimiento

La recolección de datos se realizó durante el periodo comprendido entre agosto y diciembre de 2025. Una vez obtenida la información, se procedió a:

1. Clasificar las causas identificadas bajo el modelo 6M.
2. Calcular frecuencias descriptivas y organizar las causas por categoría 6M
3. Elaborar el diagrama de Ishikawa para identificar posibles causas raíz.
4. Construir el diagrama de Pareto para priorizar las categorías con mayor impacto ponderado.
5. Analizar los resultados mediante herramientas estadísticas descriptivas.

Análisis de Datos

El análisis de datos se realizó mediante herramientas del Control Estadístico de Procesos (SPC), integrando técnicas de diagnóstico cualitativo y priorización cuantitativa. En una primera etapa, las causas identificadas a partir del cuestionario estructurado bajo el modelo 6M y la observación directa fueron clasificadas por categoría (máquina, método, material, medición, medio ambiente y mano de obra). Posteriormente, se elaboró el diagrama de Ishikawa con el fin de estructurar visualmente las posibles causas raíz que influyen en la generación de defectos del Empaque 1.

En una segunda etapa, se aplicó una matriz de priorización por impacto con el objetivo de estimar la contribución relativa de cada categoría al problema global. Debido a la ausencia de un registro histórico de defectos clasificados por categoría, se utilizó un enfoque de ponderación. Cada causa identificada en el diagrama de Ishikawa fue evaluada mediante una escala Likert de cinco niveles (1 = impacto bajo, 5 = impacto alto), considerando su influencia estimada en la ocurrencia de fallas del producto.

Las ponderaciones asignadas fueron sumadas por categoría 6M, obteniéndose un índice de impacto acumulado por dimensión. Posteriormente, se calculó el porcentaje relativo de cada categoría respecto al total de ponderaciones, lo cual permitió construir el diagrama de Pareto y establecer un orden de prioridad basado en impacto ponderado.

Este procedimiento permitió diferenciar entre la frecuencia percibida de incidencias y la contribución estructural estimada al problema, facilitando una jerarquización objetiva de las causas y proporcionando una base técnica para la toma de decisiones orientadas a la mejora del proceso productivo.

VI. RESULTADOS

Panorama General Bajo el Modelo 6M
El análisis consolidado de las seis dimensiones evaluadas muestra una incidencia promedio global del 73.6%, lo que evidencia una problemática estructural transversal en el proceso productivo del Empaque 1.
La Tabla I presenta el promedio estimado de incidencia percibida por dimensión.

Tabla I. Promedios por dimensión (diagnóstico general 6M)

Dimensión	Indicadores evaluados	Rango porcentual	Promedio estimado
Máquina	4	64% – 91%	77%
Método	4	55% – 81%	70%
Material	5	58% – 84%	71%
Medición	4	66% – 87%	80%
Medio ambiente	4	24% – 82%	63%
Mano de obra	4	64% – 91%	81%

Los resultados muestran que mano de obra (81%) y medición (80%) presentan los niveles más altos de incidencia percibida, seguidos de máquina (77%) y material (71%). Medio ambiente registra el menor promedio relativo (63%), aunque sigue representando una condición significativa dentro del sistema productivo.

La Fig. 1 ilustra gráficamente la distribución de estas incidencias.

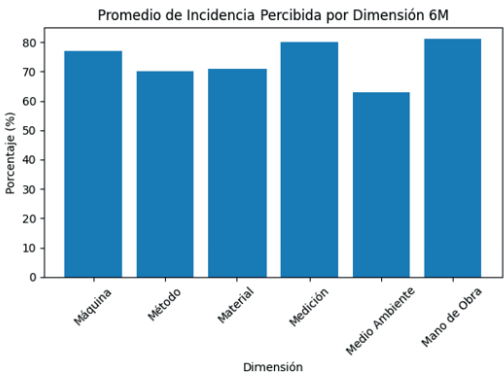


Fig. 1. Gráfica de incidencia 6M

Estos valores indican que la problemática no se limita a una sola dimensión, sino que existe interacción multifactorial entre factores técnicos, humanos y organizacionales.

Análisis por dimensión

a) Máquina

La dimensión Máquina presentó una incidencia promedio del 77%. El 91% de los participantes indicó ausencia de mantenimiento preventivo, mientras que el 82% reportó fallas frecuentes. Esto evidencia predominancia de mantenimiento reactivo, aumentando la variabilidad del proceso.

b) Método

El promedio fue de 70%. El 76% señaló inexistencia de instrucciones estandarizadas y el 68% afirmó operar por experiencia propia, generando variaciones operativas.

c) Material

Con un promedio de 71%, el 84% reportó fallas en esquineros y el 79% problemas en el cartón recibido, evidenciando debilidad en el control de proveedores.

d) Medición

La incidencia promedio fue de 80%. El 87% indicó revisión superficial y solo el 13% confirmó existencia de registros formales, reflejando ausencia de control sistemático.

e) Medio Ambiente

El promedio fue de 63%. El 82% señaló condiciones físicas inadecuadas y el 71% reportó falta de espacio y desorden.

f) Mano de Obra

Presentó la mayor incidencia promedio (81%). El 91% indicó capacitación insuficiente y el 89% reportó desmotivación laboral.

Comparación interdimensional

Aunque Medición (80%) y Mano de Obra (81%) presentan mayor percepción de incidencia, la diferencia entre dimensiones no es sustancial, confirmando el carácter multifactorial del problema.

La variabilidad del sistema no depende de una sola dimensión, sino de la interacción dinámica entre factores técnicos, humanos y organizacionales.

Análisis del diagrama de Ishikawa

El siguiente diagrama de Ishikawa muestra un análisis organizado de las posibles causas que generan los problemas de calidad en el empaque 1. La información se agrupa en seis categorías: mano de obra, método de trabajo,

máquina, medio ambiente, medición y materiales, donde se señalan factores como falta de capacitación, equipos obsoletos, condiciones de trabajo inadecuadas, registros incompletos en la medición y especificaciones de materiales poco claras. Esta representación permite comprender el problema desde diferentes perspectivas y visualizar de forma clara los elementos que influyen en la calidad del proceso.

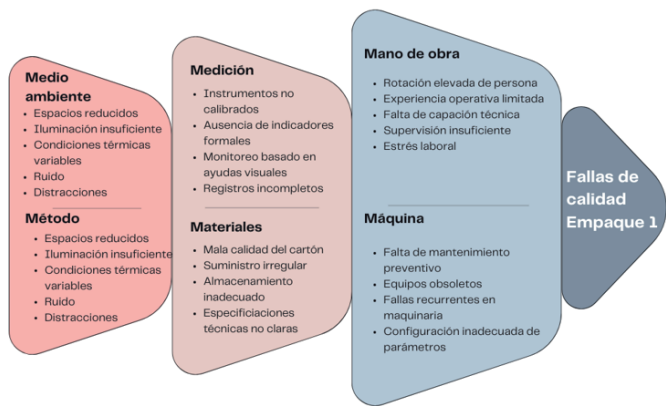


Fig. 2. Diagrama de Ishikawa del proceso Empaque 1

Los resultados indican que las categorías Máquina (31%) y Material (30%) concentran conjuntamente el 61% del impacto ponderado total, evidenciando que las causas técnicas asociadas al sistema productivo representan la mayor contribución estructural al problema.

La Fig. 3 presenta el Diagrama de Pareto con el porcentaje acumulado correspondiente, donde se observa que las dos primeras categorías superan el 60% del impacto total, confirmando la existencia de causas críticas prioritarias dentro del proceso. A partir de la tercera categoría (Método), el crecimiento de la curva acumulada se desacelera, indicando una menor contribución relativa al problema global.

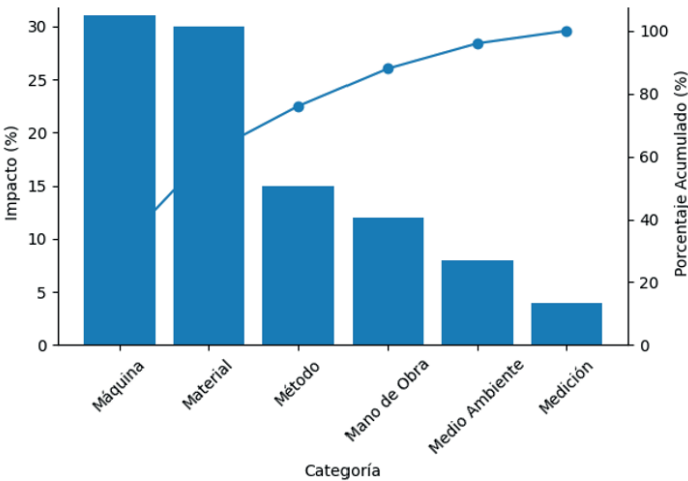


Fig. 3. Diagrama de Pareto de causas por categoría

Análisis de Priorización – Diagrama de Pareto

Para identificar las categorías con mayor contribución al problema, se realizó un análisis de priorización basado en impacto ponderado. Cada causa identificada en el diagrama de Ishikawa fue evaluada mediante una matriz de priorización en escala Likert de 1 a 5 (1 = impacto bajo, 5 = impacto alto), considerando su influencia estimada en la generación de defectos del Empaque 1.

Las ponderaciones asignadas fueron sumadas por categoría 6M, obteniéndose un índice de impacto acumulado por dimensión. Posteriormente, se calculó el porcentaje relativo de cada categoría respecto al total de ponderaciones.

Tabla II. Índice de impacto ponderado por categoría 6M

Categoría	Suma de ponderaciones	Impacto relativo (%)
Máquina	37	31%
Material	36	30%
Método	18	15%
Mano de Obra	14	12%
Medio Ambiente	10	8%
Medición	5	4%
Total	120	100%

VII. DISCUSIÓN

El análisis de frecuencias bajo el modelo 6M evidenció que las categorías Medición y Mano de Obra presentaron la mayor incidencia relativa en el cuestionario aplicado al personal del área. Este resultado sugiere una percepción elevada de fallas asociadas al control del proceso y a factores humanos, particularmente en lo referente a registros incompletos, seguimiento no sistemático y variabilidad en la ejecución operativa.

Sin embargo, al realizar la priorización mediante el diagrama de Pareto, se observó que las categorías Máquina y Material concentran aproximadamente el 61% del impacto ponderado acumulado. Esta diferencia entre percepción e impacto cuantificado indica que, aunque los factores humanos y de medición son reportados con alta frecuencia, los elementos técnicos del sistema productivo generan una contribución estructural más significativa en la ocurrencia de defectos.

Las fallas asociadas a la maquinaria reflejan deficiencias en mantenimiento preventivo y estabilidad operativa, lo cual incrementa la variabilidad del proceso y afecta directamente operaciones críticas como el grapado y el armado. Por su parte, las variaciones en materiales y condiciones de almacenamiento influyen en la resistencia y desempeño estructural del empaque, especialmente en situaciones de estiba.

El carácter multifactorial del problema confirma que la variabilidad del proceso no depende de un único factor aislado, sino de la interacción dinámica entre variables técnicas, humanas y organizacionales. Esta interacción explica por qué categorías con menor porcentaje acumulado pueden actuar como factores amplificadores cuando coinciden con fallas técnicas.

En conjunto, los resultados demuestran que la aplicación integrada de herramientas de SPC permitió diferenciar entre percepción operativa y contribución estructural al problema, facilitando una jerarquización objetiva de causas. Este enfoque basado en datos proporciona una base sólida para la toma de decisiones orientadas a la reducción de defectos y a la mejora continua del proceso productivo.

VIII. LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Durante el desarrollo del trabajo de campo se presentaron diversas limitaciones que influyeron en la ejecución del estudio. En primer lugar, el tamaño de la población fue reducido (11 trabajadores), lo que limitó la posibilidad de realizar análisis estadísticos inferenciales y generalizar los resultados a otros procesos o números de parte dentro de la empresa.

En segundo lugar, la recolección de datos estuvo sujeta a ajustes logísticos debido a imprevistos operativos en la planta, como retrasos ocasionados por urgencias en producción y modificaciones en los horarios de entrevista. Aunque se logró completar la información necesaria, estos eventos limitaron la posibilidad de mantener un esquema de aplicación completamente estructurado.

Asimismo, el análisis se centró exclusivamente en el número de parte 1, lo que restringe la comparación con otros productos o líneas de producción. Esta delimitación fue necesaria para enfocar el estudio, pero impide extrapolar los resultados a toda la organización.

Finalmente, el diagrama de Pareto se elaboró con base en impacto ponderado mediante una matriz de priorización estructurada, debido a la ausencia de un sistema histórico de defectos clasificados por categoría.

IX. RECOMENDACIONES

Con base en los hallazgos obtenidos, se proponen las siguientes acciones:

1. Implementar un programa formal de mantenimiento preventivo para reducir la frecuencia de fallas en maquinaria y aumentar la estabilidad del proceso.
 2. Establecer un sistema de verificación y control de recepción de materiales, incluyendo inspección sistemática y registro documentado.
 3. Estandarizar procedimientos operativos mediante instrucciones de trabajo documentadas para reducir variaciones entre turnos.
 4. Implementar herramientas formales de Control Estadístico de Procesos (SPC), como gráficas de control, para monitorear la variabilidad en tiempo real.
 5. Desarrollar programas de capacitación continua enfocados en control de calidad y buenas prácticas operativas.
 6. Mejorar las condiciones del entorno laboral para favorecer la concentración y el desempeño del personal.
- La implementación conjunta de estas acciones permitiría disminuir la variabilidad del proceso y reducir la incidencia de defectos en el Empaque 1.

X. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió identificar y estimar la contribución relativa de las causas principales de falla en la producción del Empaque 1 mediante la aplicación de herramientas del Control Estadístico de Procesos (SPC). A través del cuestionario estructurado bajo el modelo 6M, el diagrama de Ishikawa y el análisis de Pareto, fue posible clasificar y priorizar los factores que influyen en la generación de defectos.

Los resultados evidencian que el problema presenta un carácter multifactorial, destacando la influencia de variables asociadas a maquinaria, materiales y control del proceso. La interacción de estos factores confirma que la variabilidad del sistema productivo no depende de un único elemento aislado, sino de la dinámica conjunta del proceso.

La hipótesis planteada se valida, ya que la aplicación de herramientas SPC permitió no solo identificar, sino también estimar la contribución relativa de las causas principales de falla, proporcionando una base objetiva para la toma de decisiones y la implementación de mejoras orientadas a fortalecer la calidad y confiabilidad del proceso productivo.

X. BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. A. López, E. M. Chaparro, and J. Álvarez, "Estudio del nivel de uso del Control Estadístico de Procesos (CEP) en empresas manufactureras del Valle de Toluca," *Revista de Investigación Latinoamericana en Competitividad Organizacional*, vol. 25, no. 7, p. 139, 2025.
- [2] J. Restrepo, "Identificación de factores que afectan la apariencia en el proceso de producción de papel corrugado medio y liner destinado para el uso de empaques," Tesis de licenciatura, Universidad de Antioquia, 2019.
- [3] F. Aucarui Rivera, "Implementación del Lean manufacturing para reducir los desperdicios en la máquina flexográfica de una empresa de empaques de cartón," Tesis de licenciatura, Universidad Tecnológica del Perú, 2024.
- [4] T. E. Otavalo, D. C. Paredes, L. C. Calderón, and V. R. Guerra, "Importancia de la gestión de calidad en la productividad empresarial de las microempresas textiles de la ciudad de Otavalo," *Revista Espacios*, vol. 44, no. 5, pp. 41–42, 2023.
- [5] C. S. Arroyo and R. F. Obando, "Importancia de la implementación de mantenimiento preventivo en las plantas de producción para optimizar procesos," *E-IDEA Journal of Engineering Science*, vol. 10, no. 4, p. 66, 2022.
- [6] S. P. Leal and S. M. Castro, "Mejora en el proceso productivo mediante la metodología Six Sigma del sector cerámico," *Revista Publicaciones e Investigación*, vol. 16, no. 1, p. 7, 2022.
- [7] J. Espinoza and M. Sánchez, "Aplicación del SPC y Poka Yoke para la mejora del flujo productivo," *Revista de Ingeniería Industrial*, vol. 12, no. 3, p. 53, 2024.
- [8] J. Molina et al., "Aplicación del diagrama de Ishikawa en procesos industriales," *Revista de Calidad y Productividad*, vol. 18, no. 2, p. 65, 2023.
- [9] J. M. Juran, *Quality Handbook*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1999.



Mónica Paulina López Arteaga es docente adscrita al Departamento de Ingeniería Industrial del Instituto Tecnológico de Saltillo, perteneciente al Tecnológico Nacional de México. Cuenta con más de 15 años de experiencia en educación superior y formación de ingenieros. Sus líneas de interés

académico incluyen innovación educativa, inteligencia artificial aplicada a la educación, inteligencia emocional y desarrollo de competencias en estudiantes universitarios. Ha participado en proyectos de vinculación con el sector industrial y en el diseño de programas de capacitación docente, además de ser autora de publicaciones académicas en educación superior e ingeniería industrial.



Francisco Omar Calvillo Pinales es estudiante de Ingeniería Industrial en el Instituto Tecnológico de Saltillo, donde actualmente cursa el noveno semestre de la carrera. Cuenta con experiencia en el sector industrial, habiendo colaborado en la empresa Empaques DAFI, dedicada a la fabricación de

soluciones de empaque en cartón y plástico para la protección y transporte de productos industriales. Se ha desempeñado como supervisor de producción. Sus intereses se orientan a la gestión de operaciones y mejora de procesos, destacando por sus habilidades de comunicación, trabajo en equipo y liderazgo en entornos organizacionales.



Erick Alejandro Berlanga Sierra es estudiante de Ingeniería Industrial en el Instituto Tecnológico de Saltillo, donde actualmente cursa el noveno semestre de la carrera. Se desempeña profesionalmente en la empresa ORAFOL, dedicada al desarrollo de materiales plásticos de alta tecnología y soluciones

adhesivas industriales. Ha participado activamente en procesos de mejora dentro del área de pintura, aportando propuestas que han contribuido a la optimización de procesos productivos. Sus intereses se orientan a la mejora continua, eficiencia operativa e innovación en procesos industriales.

Modelado FEM con Criterio Hill-48 para la Predicción del Retorno Elástico en Doblado en V de Acero Martensítico CRMS1700

Hernández Alcalá Néstor Enrique ¹ ibq.nestor.hdz@outlook.com

MayenChaires Jan ¹ addy.pc@conkal.tecnm.mx

De La Calleja Mora Elsa María ¹ elsa.delacalleja@ciateq.mx

¹CIATEQ A.C., Centro de Tecnología Avanzada Querétaro México

ABSTRACT

Springback in advanced high-strength martensitic steels compromises the dimensional tolerances of automotive components and limits the industrial adoption of ultra-high-strength grades. This work presents a finite element model based on the Hill-48 plane-stress yield criterion to predict the springback angle in V-bending of CRMS1700 martensitic steel with 2.0 mm thickness, formed on a 100° die with intentional overbend. The material was characterized from the lot mill certificate, using the Swift hardening law fitted through the Considère criterion and an effective unloading modulus accounting for quasi-plastic-elastic degradation; Hill-48 coefficients were assigned from published values, yielding null planar anisotropy. The model was implemented in ANSYS Mechanical 2026 R1 with SOLID186 elements and Augmented Lagrange contact. Numerical verification through the Grid Convergence Index yielded $p = 1.319$, $GCI = 2.906\%$ and an extrapolated solution of 16.396° . Parametric analysis employed a Box-Behnken design on punch radius, die opening and friction coefficient; the reduced quadratic model achieved $R^2(\text{pred}) = 75.40\%$, with die opening as the dominant factor ($F = 119.99$) and a friction contribution through curvature and interactions that qualifies its customary treatment as a negligible variable. Experimental validation on nine specimens across three rolling directions yielded 14.467° against 14.764° predicted, a relative error of 2.053% , below the model's own discretization uncertainty.

Keywords: Box-Behnken design, experimental validation, Hill-48, martensitic steel, springback.

RESUMEN

El retorno elástico en aceros martensíticos avanzados de alta resistencia compromete las tolerancias dimensionales en componentes automotrices y limita la adopción industrial de grados de ultra alta resistencia. Este trabajo presenta un modelo de elementos finitos con criterio de fluencia Hill-48 en tensión plana para predecir el ángulo de retorno elástico en doblado en V de acero martensítico CRMS1700 de 2.0 mm de espesor, conformado sobre matriz de 100° con sobredoblado intencional. El material se caracterizó desde el certificado siderúrgico del lote, con ley de Swift ajustada por criterio de Considère y módulo efectivo de descarga que incorpora la degradación cuasi plástica elástica; los coeficientes Hill-48 se asignaron desde literatura, resultando en anisotropía planar nula. El modelo se implementó en ANSYS Mechanical 2026 R1 con elementos SOLID186 y

contacto Augmented Lagrange. La verificación mediante el Índice de Convergencia de Malla arrojó $p = 1.319$, $GCI = 2.906\%$ y solución extrapolada de 16.396° . El análisis paramétrico empleó un diseño Box-Behnken sobre radio de punzón, apertura de matriz y coeficiente de fricción; el modelo cuadrático reducido alcanzó $R^2(\text{pred}) = 75.40\%$, con la apertura como factor dominante ($F = 119.99$) y una contribución de la fricción mediante curvatura e interacciones que matiza su tratamiento habitual como variable despreciable. La validación experimental sobre nueve probetas en tres direcciones de laminación arrojó 14.467° frente a 14.764° predichos, con error relativo de 2.053% , inferior a la propia incertidumbre de discretización del modelo.

Palabras clave: Acero martensítico, diseño Box-Behnken, Hill-48, retorno elástico, validación experimental.

I. INTRODUCCIÓN

El retorno elástico (springback) es el cambio de forma elástica que experimenta una pieza de lámina al retirar las cargas externas tras el conformado, fenómeno que explica por qué un ángulo o una curvatura se abren al descargar y produce desviaciones geométricas respecto al diseño nominal [1], [2]. En doblado en V, el retorno elástico angular θ , entendido como el incremento del ángulo entre los brazos libres tras la descarga, es la métrica primaria adoptada en este trabajo por ser directamente medible y la más empleada en la literatura.

En el sector automotriz, donde las tolerancias dimensionales para componentes estampados son del orden de ± 0.70 mm a ± 1.20 mm según las especificaciones genéricas Ford WSS-M99P1111-A, el retorno elástico es la causa principal de rechazo dimensional y de los ciclos iterativos de compensación de troquel que retrasan los lanzamientos de producción [3].

La situación se agrava cuando el material conformado es un acero martensítico (MS) de la familia de aceros avanzados de alta resistencia (AHSS), cuya resistencia a la fluencia σ_y supera los 1,000 MPa y puede llegar a 1,700 MPa. Para el CRMS1700 empleado en este estudio, la relación entre el esfuerzo de fluencia certificado y el módulo efectivo de descarga alcanza $\sigma_y/E = 7.83 \times 10^{-3}$, aproximadamente 6.6 veces superior a la de un acero convencional de bajo carbono. Puesto que el ángulo de retorno elástico en doblado es proporcional a esa relación [2], el material presenta, por definición de sus propiedades, un springback

estructuralmente más pronunciado y una sensibilidad amplificada a las variables del proceso [1], [4].

Esta condición explica una situación paradójica de la industria. Los aceros martensíticos de la clase de resistencia del CRMS1700 permanecen subutilizados en componentes estructurales de carrocería, no por costo de material ni por limitaciones de soldabilidad, sino precisamente por la dificultad práctica de controlar dimensionalmente su recuperación elástica [1], [26]. Un modelado confiable del retorno elástico deja entonces de ser un refinamiento opcional y se convierte en la condición habilitante para sustituir aceros de menor resistencia y mayor espesor, con la reducción de masa vehicular que ello permite.

La predicción del retorno elástico mediante simulación por elementos finitos (FEM) ha avanzado en el modelado constitutivo, el contacto y la descarga elástica [2], [5], [6]. El criterio cuadrático de Hill (1948), generalización ortótropa de von Mises para materiales ortotrópicos, es la opción más extendida en conformado industrial por su implementación nativa en solvers comerciales [7]. Su incorporación no es prescindible: la omisión de la anisotropía plástica en aceros laminados de alta resistencia produce subestimaciones sistemáticas del retorno elástico que pueden superar los 2° en configuraciones de doblado severo [9]. De forma complementaria, la degradación del módulo elástico durante la descarga, documentada por Sun y Wagoner como comportamiento cuasi plástico elástico, constituye una segunda fuente de sesgo que el presente trabajo incorpora mediante un módulo efectivo calibrado y no mediante la rigidez nominal del material [6].

La literatura reciente aborda el problema desde tres frentes que rara vez convergen en un mismo estudio. Karabulut et al. evaluaron el desempeño predictivo de Hill-48 frente a criterios alternativos en doblado en V de acero SCGADUB1180, con validación experimental directa, pero sin cuantificación formal del error de discretización ni análisis sistemático de sensibilidad [4]. Asmael et al. aplicaron un diseño Box-Behnken sobre aleación AA5052 y establecieron la jerarquía estadística de los factores de proceso, sin criterio anisótropo ni verificación de malla [8]. Karakaya y Erdoğan extendieron el enfoque a AA7075-T6 en conformado en caliente [15] y Wasif et al. optimizaron el retorno elástico en JSH440 mediante diseño factorial [16], en ambos casos sin verificación numérica formal. A ello se suma que la cuantificación rigurosa del error de discretización espacial, mediante el Índice de Convergencia de Malla propuesto por Roache y refinado por Schwer [20], [21], y sistematizado

como procedimiento de reporte de incertidumbre por Celik et al. [25], sigue siendo infrecuente en conformado de lámina, donde la práctica dominante compara dos mallas sin estimar el orden de convergencia ni el error de Richardson.

De esta revisión se desprende el vacío que motiva el presente trabajo. No se identificaron estudios que integren, sobre un acero martensítico de resistencia superior a 1,500 MPa, la caracterización constitutiva trazable a certificado siderúrgico, la verificación numérica formal del error de discretización, el análisis sistemático de sensibilidad mediante diseño de experimentos y la validación experimental directa en banco instrumentado. Cada elemento aparece de forma aislada en la literatura, pero es su integración lo que permite declarar un modelo como herramienta de ingeniería y no solo como ejercicio numérico.

El presente trabajo desarrolla, verifica y valida experimentalmente un modelo de elementos finitos con criterio Hill-48 en tensión plana, implementado en ANSYS Mechanical 2026 R1, para la predicción del ángulo de retorno elástico en doblado en V de acero martensítico CRMS1700 de 2.0 mm de espesor, conformado sobre matriz de 100° con sobredoblado intencional.

La contribución integra cuatro ejes: (i) caracterización constitutiva desde el certificado siderúrgico mediante ley de Swift con offset de deformación y módulo efectivo de descarga; (ii) verificación numérica con el Índice de Convergencia de Malla sobre cuatro niveles de refinamiento; (iii) análisis de sensibilidad con diseño Box-Behnken sobre radio de punzón R_p , apertura de matriz W y coeficiente de fricción μ [8], [22]; y (iv) validación experimental directa sobre nueve probetas distribuidas en tres direcciones de laminación, con contraste cuantitativo entre predicción y medición.

I.I. OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS.

A. Objetivo General

Desarrollar, verificar y validar experimentalmente un modelo de elementos finitos con criterio de fluencia Hill-48 en tensión plana para la predicción del ángulo de retorno elástico en doblado en V de acero martensítico CRMS1700 de 2.0 mm de espesor, sustentado en caracterización constitutiva trazable a certificado siderúrgico, verificación numérica por Índice de Convergencia de Malla, análisis de sensibilidad paramétrica mediante diseño Box-Behnken y contraste directo contra mediciones en banco instrumentado.

B. Objetivos Específicos

- Caracterizar las propiedades constitutivas del acero CRMS1700 a partir del certificado siderúrgico del lote, calibrando la ley de Swift con offset de deformación y un módulo efectivo de descarga que incorpore la degradación cuasi plástica elástica, y asignando los coeficientes anisotrópicos Hill-48 desde literatura especializada en aceros martensíticos de clase de resistencia comparable.
- Implementar el modelo FEM en ANSYS Mechanical 2026 R1 con elementos SOLID186, contacto Augmented Lagrange y protocolo cuasi estático de cuatro pasos para simular el doblado en V sobre matriz de 100°.
- Verificar la independencia de malla mediante el protocolo del Índice de Convergencia de Malla sobre cuatro niveles de refinamiento, con criterio de aceptación $GCI_{21} < 5\%$.
- Cuantificar la sensibilidad del ángulo θ frente a los factores de proceso R_p , W y μ mediante un diseño Box-Behnken, ajustando un modelo cuadrático de superficie de respuesta e identificando la jerarquía estadística de factores.
- Validar experimentalmente la predicción del modelo mediante ensayo en banco sobre probetas en tres direcciones de laminación, con criterio de aceptación del error relativo de predicción $KPI2 \leq 5\%$.

II. DESARROLLO DE CONTENIDOS

El estudio sistemático del retorno elástico en lámina inició con los trabajos experimentales fundacionales que establecieron las métricas reproducibles del fenómeno y los factores de proceso dominantes. Carden et al. propusieron un protocolo de doblado bajo tensión (draw-bend) que separa la contribución de la flexión pura de la tracción superpuesta, y definieron el cambio de curvatura $\Delta\kappa$ y el ángulo θ post-descarga como métricas comparables entre estudios; sus resultados identificaron al radio de punzón R_p como la variable de mayor sensibilidad sobre θ , seguida por la tensión de sujeción y el coeficiente de fricción μ [10]. El θ de Carden et al. corresponde a draw-bend y es comparable y no equivalente al θ de doblado en V, pues difieren en el estado de tensión y la configuración del proceso.

Burchitz extendió este marco mediante una síntesis crítica de las fuentes de error numérico en la predicción del retorno elástico, mostrando que el sesgo del ángulo simulado proviene de manera dominante de cuatro factores: la representación del módulo elástico durante la descarga, la rigidez del contacto, la regularización de la fricción y la densidad de malla en la zona de flexión de lámina [2]. Esta jerarquización ha orientado durante las dos últimas décadas

las decisiones metodológicas en simulación FEM de conformado de lámina. En el presente trabajo los cuatro factores quedan atendidos de forma explícita: el módulo de descarga se incorpora como valor efectivo calibrado y no como rigidez nominal, el contacto se formula con Augmented Lagrange, la fricción μ se trata como factor del DOE y la densidad de malla se evalúa mediante el Índice de Convergencia de Malla.

El primero de esos cuatro factores merece atención particular por ser el que más frecuentemente se omite. Sun y Wagoner demostraron experimentalmente que el módulo aparente de descarga en aceros de alta resistencia puede reducirse hasta en un 22% respecto al valor de enlace atómico, efecto denominado cuasi plástico elástico (QPE) y atribuido a la relajación de dislocaciones móviles durante la descarga [6]. Dado que la magnitud del retorno elástico es directamente proporcional a la energía elástica liberada, emplear la rigidez nominal del material en lugar del módulo efectivo introduce un sesgo sistemático de subestimación. El presente trabajo incorpora este efecto mediante un módulo efectivo de descarga $E_{ef} = 193,200$ MPa, equivalente a una degradación del 8% respecto al valor nominal de 210,000 MPa, magnitud situada dentro del rango documentado por Sun y Wagoner para esta clase de materiales [6].

La representación del endurecimiento plástico plantea una decisión análoga. La ley de Hollomon en su forma simple $\sigma = K\epsilon^n$ impone $\sigma = 0$ en deformación plástica nula, condición que impide anclar la curva al esfuerzo de fluencia certificado y obliga a calibrar sobre un único punto experimental. La ley de Swift, variante ampliamente utilizada en la literatura metalúrgica para aceros AHSS, resuelve esta limitación mediante un offset de deformación ϵ_0 que permite el anclaje simultáneo del esfuerzo de fluencia y de la resistencia última [9], [4]. Esta formulación es la adoptada en el presente trabajo, con el exponente n determinado mediante el criterio de Considère, que para leyes de potencia conduce a la identidad entre la deformación uniforme y el exponente de endurecimiento [9].

El criterio cuadrático de Hill ha permanecido como referencia industrial para la representación de la anisotropía plástica en aceros laminados con r -values próximos a la unidad [7]. La formulación en tensión plana, calibrada a partir de las relaciones de Lankford r_0 , r_{45} y r_{90} , captura el locus elíptico de fluencia con cuatro parámetros independientes (F , G , H , N) e implementación nativa en los principales solvers comerciales [11], [18]. Criterios no cuadráticos como Yld2000-2d y modelos de endurecimiento cinemático tipo

Yoshida-Uemori mejoran la representación del locus de fluencia y de las trayectorias de carga inversa, respectivamente [12], [13]. Sin embargo, requieren implementación mediante subrutina de usuario y un mayor número de parámetros experimentales, lo que no resulta justificable para aceros martensíticos con anisotropía planar Δr próxima a cero, condición característica del CRMS1700, donde Hill-48 con endurecimiento isótropo multilineal ofrece un balance adecuado entre precisión y robustez para este alcance [11], [14].

Esta cuasi isotropía planar no es una simplificación de conveniencia sino una consecuencia de la microestructura. La transformación martensítica distribuye las variantes de fase de forma cuasi aleatoria y disminuye la memoria textural del laminado, de modo que la direccionalidad de propiedades resulta considerablemente menor que en aceros ferríticos convencionales. Karabulut et al. reportaron r-values entre 0.76 y 0.78 para el SCGADUB1180 con variación inferior al 3% entre orientaciones, evidencia consistente con esta interpretación [4]. La consecuencia metodológica es directa: si la dirección de laminación no incide de forma significativa sobre la respuesta, puede excluirse como factor del diseño experimental, lo que reduce el número de corridas necesarias sin pérdida de validez estadística. El presente trabajo somete esta hipótesis a verificación experimental y no la asume como premisa.

El diseño de experimentos aplicado a la predicción del retorno elástico ha consolidado el uso de superficies de respuesta como herramienta para caracterizar la sensibilidad de θ frente a los factores de proceso. Asmael et al. emplearon un diseño Box-Behnken sobre AA5052 con análisis ANOVA y regresión polinómica, identificando la jerarquía $R_p > W > \mu$ con coeficientes de determinación superiores al 95% [8]. Karakaya y Erdoğan extendieron este enfoque a aluminio AA7075-T6 en condiciones de conformado en caliente, confirmando la curvatura significativa del término cuadrático mediante ANOVA de segundo orden [15]. Estudios análogos en otros sistemas, como Wasif et al. en JSH440 [16] y Karabulut et al. en SCGADUB1180 [4], confirman la consistencia del enfoque DOE-RSM para jerarquizar factores de proceso, reportando además que Hill-48 ofrece diferencias inferiores a 0.6° respecto a Barlat-89 en aceros AHSS de clase de resistencia comparable.

Un rasgo común a estos antecedentes es el tratamiento de la fricción como factor de segundo orden, cuando no directamente despreciable. Karabulut et al. reportaron su no

- significancia en doblado en V bajo lubricación industrial [4] y Asmael et al. la ubicaron en el último lugar de la jerarquía de factores [8]. El presente trabajo aporta evidencia que matiza esa lectura: la fricción no se manifiesta como efecto lineal aislado, pero sí a través de curvatura y de interacciones con la geometría del utilaje, lo que impide tratarla como variable secundaria en el control dimensional del proceso.
- Finalmente, la credibilidad de un modelo computacional de ingeniería no se establece con un único indicador. Ferziger, Perić y Street definen como protocolo mínimo la secuencia de verificación numérica, validación cualitativa y validación experimental cuantitativa [28]. La primera etapa exige cuantificar el error de discretización espacial: el Índice de Convergencia de Malla, propuesto por Roache [20], refinado por Schwer [21] y sistematizado como procedimiento de reporte de incertidumbre por Celik et al. [25], constituye el estándar aceptado en mecánica computacional. Su adopción en conformado de lámina, sin embargo, es infrecuente. La mayoría de los trabajos compara dos mallas sin cuantificar el orden de convergencia ni el error de Richardson, lo que limita la reproducibilidad del modelo. La Tabla I resume los antecedentes más relevantes y posiciona la contribución del presente trabajo.

TABLA I. RESUMEN DE ANTECEDENTES EN MODELADO DEL RETORNO ELÁSTICO VS PRESENTE TRABAJO				
Autor	Material	Modelo	Verif.	Diferencia
Parra Rodríguez (2020) [17]	DP (varios grados)	FEM ANSYS, Hill-48 / Barlat	No	Sin DOE; material distinto
Karabulut et al. (2024) [4]	SCGADUB 1180 (AHSS)	FEM AutoForm, Hill-48 vs Barlat-89 + cinemático	Si	Sin DOE; verificación parcial
Asmael et al. (2023) [8]	AA5052 (Al)	FEM + DOE BBD, ANN/RSM	No	Isótropo; material distinto
Karakaya y Erdoğan (2025) [15]	AA7075-T6 (Al, warm)	FEM ANSYS + ANOVA	No	Warm forming; sin Hill-48
Wasif et al. (2021) [16]	JSH440 (HSS hot-rolled)	FEM + DOE factorial	Si	Sin verificación numérica formal
Presente trabajo (2026)	CRMS1700 (MS, 1513 MPa)	FEM ANSYS Hill-48 + Swift + E_{ef} + DOE BBD	Si	Integra los cuatro ejes

Nota. Elaboración propia con base en las fuentes citadas.

No se ha identificado un estudio que integre los cuatro ejes, Hill-48 con módulo efectivo de descarga, verificación GCI, DOE Box-Behnken y validación experimental directa, sobre un acero martensítico CRMS1700 con caracterización trazable a certificado siderúrgico. El presente trabajo aborda esta brecha.

III. METODOLOGÍA

III.I. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO.

El procedimiento metodológico se estructura en cuatro etapas secuenciales: caracterización constitutiva del material a partir del certificado siderúrgico, construcción y verificación numérica del modelo FEM, análisis de sensibilidad mediante diseño de experimentos y validación experimental directa en banco instrumentado. Las cuatro etapas comparten un mismo objetivo de respuesta: la cuantificación del ángulo de retorno elástico θ medido tras la descarga completa de las herramientas en una configuración de doblado en V. Esta secuencia aborda en orden lógico las tres fuentes de incertidumbre del problema (representación constitutiva, error de discretización y sensibilidad paramétrica) y cierra con el contraste contra la respuesta física real, lo que garantiza la trazabilidad científica de las conclusiones conforme al protocolo de credibilidad establecido para modelos computacionales de ingeniería [28].

La configuración de doblado adopta una matriz con cavidad de 100°, es decir, un sobredoblado intencional de 10° respecto al ángulo recto nominal. Esta decisión responde a la magnitud esperada del retorno elástico en un acero martensítico de esta clase de resistencia: conformar directamente a 90° produciría, tras la descarga, un ángulo final considerablemente abierto respecto al objetivo geométrico, mientras que el sobredoblado permite que la recuperación elástica aproxime la pieza a la condición deseada. El ángulo de retorno elástico se define en consecuencia como la diferencia entre el ángulo interior de la probeta tras la descarga completa y el ángulo bajo carga, criterio aplicado de forma equivalente en simulación y en banco para asegurar comparabilidad directa entre ambas respuestas.

La caracterización constitutiva se realiza por dos vías complementarias. El comportamiento de endurecimiento plástico se representa mediante la ley de Swift, una ley de potencia con offset de deformación que, a diferencia de la forma de Hollomon simple, permite anclar la curva simultáneamente al esfuerzo de fluencia y a la resistencia última certificados:

$$\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon_p)^n$$

Donde K es el coeficiente de resistencia, n el exponente de endurecimiento, ϵ_0 la deformación de offset que ancla la curva al punto de fluencia certificado y ϵ_p la deformación plástica verdadera.

El exponente n se determina mediante el criterio de Considère, que para leyes de potencia establece la identidad entre la deformación uniforme al inicio de la estricción y el exponente de endurecimiento [9]. Los parámetros K y ϵ_0 se calibran conjuntamente resolviendo el sistema de dos ecuaciones que impone el paso de la curva por ambos puntos certificados:

$$K = UTS(e^n)/n^n \quad \epsilon_0 = (\sigma_y/K)^{1/n}$$

La curva resultante se discretiza en dieciséis puntos para su implementación como endurecimiento isotrópico multilíneal, con mayor densidad de puntos en la región de baja deformación donde la curvatura es más pronunciada, y se extiende más allá del punto de estricción para dar soporte a la estabilidad numérica del solver en las zonas de contacto de alta deformación.

Las propiedades elásticas se establecen a partir del valor nominal reportado en literatura para acero martensítico, corregido por la degradación cuasi plástica elástica documentada por Sun y Wagoner [6]. El módulo efectivo de descarga, y no el valor nominal de enlace atómico, es el que se ingresa como propiedad isotrópica del material, decisión que evita la subestimación sistemática del retorno elástico señalada en la Sección II.

Las razones de esfuerzo de fluencia del criterio Hill-48 que constituyen la formulación nativa de ANSYS Mechanical para la anisotropía plástica se asignan a partir de los valores de Lankford r_0 , r_{45} y r_{90} reportados en literatura especializada para aceros martensíticos de la misma clase de resistencia que el material de estudio [4], [19]. Esta asignación desde literatura, sin medición directa sobre el lote, delimita el alcance constitutivo del modelo y se declara explícitamente como limitación metodológica en la Sección V. La medición directa mediante ensayos según ASTM E517 [18] constituye la extensión natural del trabajo.

El modelo FEM se construye en ANSYS Mechanical 2026 R1 con una representación tridimensional que aprovecha la simetría planar del proceso. La lámina se discretiza con elementos hexaédricos de orden cuadrático SOLID186, elección justificada por su capacidad para resolver gradientes de esfuerzo en dirección del espesor, condición relevante en un material modelado con criterio anisótropo. Las herramientas se modelan como sólidos rígidos, dado que su deformación elástica es despreciable frente a la de la lámina. El contacto se formula con Augmented Lagrange, preferible a la penalización pura en problemas de retorno

elástico porque garantiza la impenetrabilidad sin introducir rigidez artificial que altere la distribución de esfuerzos residuales [26].

La secuencia de simulación se ejecuta en un protocolo cuasi estático de cuatro pasos sucesivos: posicionamiento con contacto inicial sin deformación plástica significativa, conformado mediante desplazamiento prescrito del punzón hasta la profundidad nominal, permanencia bajo carga con retiro parcial que estabiliza la solución de contacto, y descarga elástica completa que libera la lámina sin restricción cinemática. El ángulo θ se cuantifica al finalizar el cuarto paso mediante un parámetro geométrico definido sobre selecciones nominales de nodos, como la diferencia de desplazamientos verticales entre los extremos de la sección de medición:

$$\theta_{\text{sim}} = \arctan\left(\frac{[UY]_{\text{H}} - [UY]_{\text{E}}}{L_{\text{ref}}}\right)$$

donde UYH y UYE corresponden a los desplazamientos promedio en los nodos de referencia del brazo de la lámina antes y después de la descarga, y Lref es la longitud proyectada de medición. Según Karabulut et al. (2024), la medición geométrica del ángulo mediante parámetros nodales de desplazamiento ofrece mayor repetibilidad que la inspección visual directa en simulaciones de doblado de aceros martensíticos [4].

La verificación numérica del modelo se sustenta en el Índice de Convergencia de Malla según el protocolo propuesto por Roache [20], refinado por Schwer [21] y sistematizado por Celik et al. [25]. El procedimiento evalúa primero la razón de incrementos sucesivos entre tres mallas consecutivas para confirmar el régimen de convergencia:

$$R = \left| \frac{\epsilon_{21}}{\epsilon_{32}} \right| = (f_2 - f_1) / (f_3 - f_2)$$

donde f_1 , f_2 y f_3 son las soluciones de las mallas fina, media y gruesa del triplete. La condición $0 < R < 1$ identifica convergencia monótona y habilita la aplicación formal del índice; valores fuera de ese rango indican comportamiento oscilatorio o errático que obliga a excluir la malla correspondiente del triplete de verificación [25]. Con el orden de convergencia aparente p determinado sobre el triplete válido, el índice se calcula con factor de seguridad $F_s = 1.25$:

$$[GCI]_{21} = F_s \frac{\epsilon_{21}}{(r_{21}^p - 1)} \times 100\%$$

y la solución numéricamente convergida se estima por extrapolación de Richardson:

$$\theta^* = f_1 \epsilon_{21} / (r_{21}^p - 1)$$

Se declara independencia de malla cuando $GCI_{21} < 5\%$, umbral coherente con problemas de mecánica de sólidos que incorporan no linealidad simultánea por plasticidad y contacto, donde la incertidumbre de discretización resulta estructuralmente mayor que en problemas puramente elásticos.

El análisis paramétrico se ejecuta mediante un diseño Box-Behnken de tres factores en tres niveles codificados ($-1, 0, +1$), con doce puntos de borde y un punto central, para un total de trece corridas [22]. Los factores son el radio de punzón R_p , la apertura de matriz W y el coeficiente de fricción μ , manteniendo el radio de matriz como variable dependiente $R_d = R_p + 2 \text{ mm}$ conforme al criterio de diseño de utillaje establecido. La dirección de laminación se excluye como factor sobre la base de la anisotropía planar prácticamente nula del material, hipótesis que la cuarta etapa somete a verificación experimental independiente. El diseño Box-Behnken se selecciona sobre el diseño compuesto central por prescindir de los puntos en las esquinas del cubo experimental, que en esta aplicación corresponden a condiciones de conformado severo con alto costo computacional y riesgo de no convergencia del solver [22]. El modelo de respuesta cuadrático completo se ajusta por mínimos cuadrados ordinarios en Minitab Statistical Software v.22:

$$\theta = \beta_0 + \sum_{(i=1)}^3 \beta_i x_i + \sum_{(i=1)}^3 \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{(i < j)} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon$$

donde β_0 es la media global; β_1 , β_2 y β_3 son los coeficientes de los efectos lineales de R_p , W y μ ; β_{12} , β_{13} y β_{23} los de las interacciones de dos factores; β_{11} , β_{22} y β_{33} los de los efectos cuadráticos puros; x_i y x_j los valores codificados en el rango $[-1, +1]$; y ϵ el término de error. El modelo se reduce eliminando términos no significativos con respeto estricto al principio de jerarquía: un término de orden superior solo se elimina si no participa en ninguna interacción retenida, y el efecto principal de un factor se mantiene si algún término que lo involucra permanece en el modelo [22].

El punto central se ejecuta una sola vez, decisión coherente con el carácter determinista del solver: la ejecución repetida con parámetros idénticos produce resultados estructuralmente iguales y la varianza del error puro tiende a cero por construcción. En consecuencia, el estadístico de falta de ajuste no es calculable, limitación estructural

inherente a los estudios de superficie de respuesta basados en simulación determinista que debe reportarse explícitamente [22]. La estabilidad numérica del modelo se aborda mediante el protocolo GCI y no mediante réplicas estadísticas.

La cuarta etapa contrasta la predicción del modelo contra la medición física directa, sobre la condición de proceso correspondiente al utillaje efectivamente construido. El criterio de aceptación se formaliza mediante dos indicadores: el error absoluto de predicción KPI1 y el error relativo porcentual KPI2 respecto a la media experimental:

$$[KPI]_1 = |\theta_{sim} - \theta_{exp}| \quad [KPI]_2 = (|\theta_{sim} - \theta_{exp}|) / \theta_{exp} \quad 100\% \leq 5\%$$

La verificación de la hipótesis de isotropía planar se realiza mediante análisis de varianza de un factor sobre la dirección de laminación, con tres réplicas por nivel en las orientaciones 0°, 45° y 90°, y nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

III.II. MATERIALES.

El acero seleccionado es CRMS1700 de 2.0 mm de espesor laminado en frío, producido por United States Steel Corporation bajo la especificación Ford WSS-M1A368-A85 [23], identificado con el certificado siderúrgico de calidad GE623850410. Es un acero martensítico AHSS empleado en componentes automotrices de seguridad estructural (travesaños, vigas de intrusión lateral, refuerzos de pilar B y de parachoques) por su alta resistencia específica [1], [26].

Las propiedades mecánicas del lote se obtuvieron del certificado de calidad emitido por el proveedor, con ensayo de tracción uniaxial y verificación de doblado en las direcciones longitudinal y transversal a radio de cuatro veces el espesor, ambas reportadas como PASS. Este último resultado constituye evidencia documental de comportamiento equivalente en las dos orientaciones principales de la lámina, consistente con la cuasi isotropía planar que se establece más adelante en esta misma sección.

La adopción del certificado siderúrgico como fuente primaria de caracterización, en sustitución de ensayos uniaxiales propios, se sostiene en dos consideraciones. Por jerarquía metrológica, el certificado fue generado con equipos de tracción calibrados en planta bajo condiciones controladas de temperatura y velocidad de deformación, con trazabilidad a la especificación del cliente, lo que lo sitúa en un nivel superior al de ensayos realizados en condiciones de

laboratorio académico con recursos limitados. Por representatividad estadística, el certificado corresponde al lote completo, mientras que un ensayo propio muestrea solo algunas probetas de una región específica de la bobina, con mayor incertidumbre asociada. Según Keeler y Kimchi (2017), las propiedades mecánicas típicas de los grados MS se reportan precisamente a partir de este tipo de certificados, que constituyen la referencia estándar de la industria automotriz para definir los parámetros de conformado [1].

El estado del material al momento del doblado es el estado de recepción: laminado en frío con tratamiento térmico aplicado en línea, sin operaciones adicionales de recocido ni deformación previa. Este estado incluye las tensiones residuales inherentes a la historia termomecánica del rolado y del enfriamiento acelerado. La decisión de no aplicar un tratamiento de relajación de tensiones es metodológicamente coherente con la práctica industrial, donde las piezas fabricadas en este grado tampoco son pretratadas antes del conformado en prensa. Según Burchitz (2008), la historia previa de deformación y el estado inicial de tensiones afectan directamente la distribución de esfuerzos al final del conformado y, por tanto, la magnitud del retorno elástico tras la descarga [2].

La relevancia del material para el fenómeno bajo estudio se evalúa a partir de la relación σ_y/E_{ef} , que gobierna la recuperación elástica en doblado. Para el CRMS1700 esta relación toma el valor $1,513 / 193,200 \approx 7.83 \times 10^{-3}$. En un acero de bajo carbono con $\sigma_y = 250$ MPa y $E = 210,000$ MPa la relación equivalente sería 1.19×10^{-3} , aproximadamente 6.6 veces menor. Puesto que el ángulo de retorno elástico en doblado es proporcional a σ_y/E [2], el CRMS1700 presenta, por definición de sus propiedades, un retorno elástico estructuralmente más pronunciado que los aceros convencionales.

TABLA II.
PROPIEDADES MECÁNICAS Y PARÁMETROS CONSTITUTIVOS DEL ACERO
CRMS1700 (GE623850410)

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Fuente
Espesor nominal	t	2.0	mm	Certificado
Densidad	ρ	7.85×10^{-6}	kg/mm ³	Certificado
Módulo de Young	E_{ef}	193.2	GPa	Calibrado (QPE)
Coef. de Poisson	ν	0.28	-	Certificado
Límite de fluencia	σ_y	1513	MPa	Certificado
Resistencia última	UTS	1753	MPa	Certificado
Elongación total	ϵ_t	7.7	%	Certificado
Coef. de resistencia	K	2264.8	MPa	Calibrado (Swift)
Exponente de endurecimiento	n	0.07	-	Calibrado (Considere)
Offset de deformación	E_0	0.003143	-	Calibrado (Swift)
Ensayo de doblado 4T	-	PASS	LONG/ TRANS	Certificado

Nota. El módulo efectivo incorpora una degradación del 8% respecto al valor nominal, dentro del rango documentado por Sun y Wagoner para el efecto cuasi plástico elástico en aceros de alta resistencia [6]. Elaboración propia.

La calibración de la ley de Swift se ancla en dos puntos del certificado. El exponente se obtiene por criterio de Considère considerando que en aceros martensíticos de ultra alta resistencia la elongación posterior a la estricción es muy reducida, de modo que la elongación total certificada aproxima razonablemente la elongación uniforme: $n = \ln(1 + 0.077) \approx 0.0742$, redondeado a 0.07 para la implementación numérica [9]. Sustituyendo en la Ec. (2) se obtienen $K = 2,264.8$ MPa y $\epsilon_0 = 0.003143$. La consistencia del ajuste se verificó evaluando la curva en el punto de fluencia: $\sigma(\epsilon_p = 0) = 2,264.8 \times (0.003143)^{0.07} = 1,513.0$ MPa, coincidente con el valor certificado sin error residual. La curva se discretizó en dieciséis puntos extendidos hasta $\epsilon_p = 0.30$ ($\sigma = 2,083.3$ MPa) para su implementación como endurecimiento isotrópico multilíneal. La Fig. 1 muestra la curva resultante, con mayor densidad de puntos en la región de baja deformación donde la curvatura es más pronunciada.

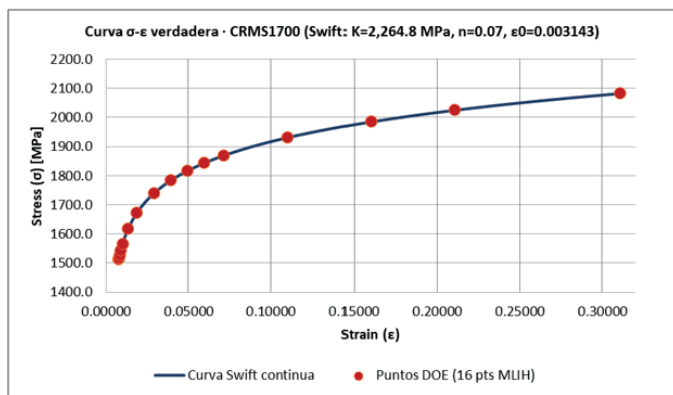


Fig. 1. Curva de endurecimiento isotrópico multilíneal del acero CRMS1700 a 25 °C, dieciséis puntos discretizados a partir de la ley de Swift con offset ($K = 2,264.8$ MPa, $n = 0.07$, $\epsilon_0 = 0.003143$). El primer punto ancla en la fluencia certificada y la curva se extiende hasta $\epsilon_p = 0.30$ para robustez numérica del solver. Elaboración propia.

Fig. 1. Curva de endurecimiento isotrópico multilíneal del acero CRMS1700 a 25 °C, dieciséis puntos discretizados a partir de la ley de Swift con offset ($K = 2,264.8$ MPa, $n = 0.07$, $\epsilon_0 = 0.003143$). El primer punto ancla en la fluencia certificada y la curva se extiende hasta $\epsilon_p = 0.30$ para robustez numérica del solver. Elaboración propia.

El criterio de fluencia anisótropo de Hill en tensión plana, condición que caracteriza el doblado de lámina delgada, se expresa mediante la función cuadrática:

$$F\sigma_{yy}^2 + G\sigma_{xx}^2 + H[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})]^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1$$

donde σ_{xx} es el esfuerzo en la dirección de laminado, σ_{yy} en la dirección transversal, τ_{xy} el esfuerzo cortante en el plano, y F , G , H y N las constantes de anisotropía, determinadas a partir de los valores de Lankford mediante las expresiones

cerradas $G = 1/(1+r_0)$, $H = r_0/(1+r_0)$, $F = r_0/[r_{90}(1+r_0)]$ y $N = (2r_{45}+1)(r_0+r_{90})/[2r_{90}(1+r_0)]$ [9]. Cuando $F = G = H = 1$ y $N = 1.5$

El criterio se reduce exactamente al de von Mises, de modo que las desviaciones respecto a estos valores cuantifican el grado de anisotropía del material.

ANSYS Mechanical implementa esta formulación mediante razones de esfuerzo de fluencia R_{ij} referidas a la dirección de laminado ($R_{11} = 1$) [24]. Sustituyendo los valores de Lankford reportados en literatura para martensíticos de clase de resistencia comparable ($r_0 = 0.90$, $r_{45} = 0.95$, $r_{90} = 1.00$) [4], se obtienen los parámetros de la Tabla III.

TABLA III.
PARÁMETROS DEL CRITERIO HILL-48 CALCULADOS PARA EL CRMS1700

Parámetro	Símbolo	Valor	Notas
Coefficiente transversal	F	0.474	Dirección TD
Coefficiente normal x	G	0.526	Dirección RD
Coefficiente normal y	H	0.474	-
Coefficiente cortante	N	1.450	Plano xy
Anisotropía media	$\bar{R}$	0.950	$r < 1$
Anisotropía planar	Δr	0.000	Comportamiento cuasi isotrópico
Razón longitudinal	R_{11}	1.000	Referencia RD, valor fijo
Razón transversal	R_{22}	1.027	Ingresado en ANSYS
Razón cortante	R_{12}	0.587	Ingresado en ANSYS

Nota. Razones de fluencia ingresadas en ANSYS Engineering Data con dirección de referencia RD. Elaboración propia.

El resultado más destacable es la anisotropía planar $\Delta r = (r_0 - 2r_{45} + r_{90})/2 = 0.000$, valor exactamente nulo según esta formulación, que implica variación angular mínima de la resistencia a la fluencia en el plano de la lámina. La suma $F + G = 1.000$ confirma la proximidad del locus al criterio de von Mises en el espacio de tensiones principales, condición bajo la cual Burchitz señala que Hill-48 ofrece predicción adecuada del estado de esfuerzos al final del conformado, a diferencia de materiales con valores de Lankford bajos como las aleaciones de aluminio, donde el criterio subestima el esfuerzo de fluencia biaxial [2].

La base física de este resultado reside en la naturaleza de la transformación martensítica, según se argumentó en la Sección II. Su consecuencia sobre el diseño experimental es la eliminación de la dirección de laminado como variable del DOE. Este proceder cuenta con respaldo estadístico independiente: en el estudio de Karabulut et al. sobre SCGADUB1180, el análisis de varianza para el retorno elástico en doblado en V arrojó para la dirección de laminado un valor de probabilidad de 0.161, con contribución al modelo de apenas 0.16% [4]. La combinación de ese antecedente experimental con el resultado analítico $\Delta r = 0$ fundamenta la reducción del diseño de 45 corridas (tres direcciones $\times$ quince) a trece corridas totales, sin pérdida de cobertura del espacio experimental. La Sección IV somete esta hipótesis a verificación experimental directa.

Se reconoce como limitación metodológica que los coeficientes de Lankford empleados provienen de literatura especializada [4] y no de ensayos directos sobre el lote específico. La medición directa de r_0 , r_{45} y r_{90} según ASTM E517 [18] constituye la extensión natural para refinar la calibración constitutiva en trabajos posteriores.

III.III. EQUIPO Y CONFIGURACIÓN DEL MODELO FEM.

La construcción geométrica del modelo reproduce los tres componentes físicos del proceso: el punzón, la matriz y la lámina de CRMS1700. La geometría del utillaje corresponde a la configuración del punto central del diseño experimental, con radio de punzón $R_p = 12$ mm ($R_p/t = 6$), apertura de matriz $W = 44$ mm y cavidad matricial de 100° . Con el propósito de reducir el costo computacional sin comprometer la representatividad física, se adoptó un modelo de media simetría longitudinal, con el plano de simetría orientado en el eje Z del sistema de referencia global. La lámina se modeló con sus dimensiones nominales de longitud y anchura, lo que permite que los brazos libres del espécimen se deformen sin restricción durante la fase de descarga [26]. La Fig. 2 muestra el ensamble completo con la malla visible, donde se aprecia la transición entre la zona de contacto bajo el punzón, densamente mallada, y los brazos de la lámina, mallados con mayor holgura por alejarse del radio de curvatura.

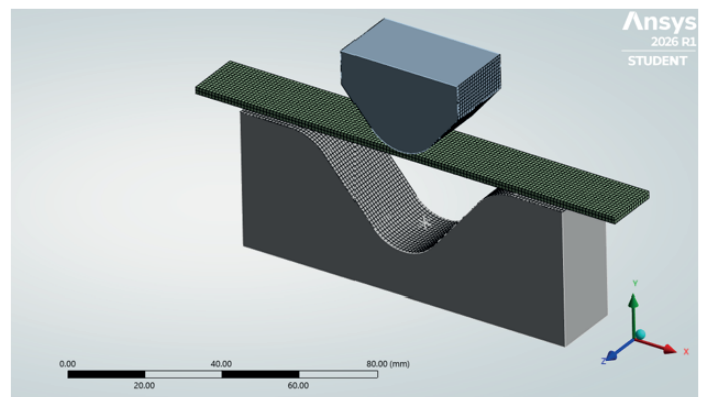


Fig. 2. Ensamble FEM del proceso de doblado en V para el punto central del diseño: punzón (cuerpo rígido superior), lámina de CRMS1700 mallada con elementos SOLID186 de $h = 1.0$ mm y matriz (cuerpo rígido inferior). Geometría: $R_p = 12$ mm, $R_d = 14$ mm, $W = 44$ mm, $t = 2.0$ mm, stroke = 22 mm. Sistema de referencia global XYZ con origen en el centroide del ensamble. Cotas en milímetros. Elaboración propia. ANSYS Mechanical 2026 R1.

La lámina se discretizó con elementos sólidos hexaédricos de veinte nodos SOLID186. Esta elección se justifica por la capacidad del elemento para capturar gradientes de esfuerzo en dirección del espesor, condición relevante en un material modelado con criterio Hill-48, y por su compatibilidad con el solver implícito de ANSYS para problemas de contacto friccional con grandes deformaciones. El mallado debe resolver con detalle el gradiente de esfuerzos en la zona de contacto bajo el radio de la herramienta, pues de ahí depende directamente la precisión de la recuperación elástica tras la descarga, conforme a las recomendaciones de Burchitz para la simulación FEM de retorno elástico [2]. El punzón y la matriz, al tratarse de herramientas de acero de alta resistencia cuya deformación elástica es despreciable frente a la de la lámina, se modelaron como cuerpos rígidos sin discretización volumétrica interna, lo que reduce el costo de la formulación del contacto. La malla global de la lámina se estableció con tamaño de elemento $h = 1.00$ mm, valor justificado formalmente mediante el análisis de convergencia y el índice GCI que se desarrollan en la Sección IV.

El comportamiento constitutivo se implementó mediante plasticidad con endurecimiento isotrópico multilineal, con los puntos de la curva verdadera esfuerzo-deformación calculados a partir de la ley de Swift según la Sección III.II. El módulo efectivo de descarga $E_{ef} = 193,200$ MPa y el coeficiente de Poisson $\nu = 0.28$ definen la respuesta elástica del material. La anisotropía plástica se incorporó mediante el criterio Hill-48 con las razones de fluencia de la Tabla III. Esta integración coherente entre la caracterización constitutiva y el modelo computacional evita introducir hipótesis de

isotropía que contradigan el comportamiento del material.

Las condiciones de frontera replican las restricciones cinemáticas del proceso físico. La matriz permanece fija en todos sus grados de libertad durante toda la simulación mediante una restricción tipo Fixed-MPC, mientras que el punzón recibe un desplazamiento prescrito en la dirección Y negativa mediante una restricción tipo Translational-MPC. En el plano de simetría se impone desplazamiento nulo en la dirección Z, consistente con el supuesto de deformación plana adoptado para esta geometría, y la lámina se restringe con desplazamiento nulo en X sobre las caras laterales para evitar inestabilidad de cuerpo rígido. La interacción entre punzón y lámina, y entre lámina y matriz, se definió mediante contacto friccional con formulación Augmented Lagrange, rigidez normal $Kn = 0.1$ y detección en puntos de Gauss [24].

El coeficiente de fricción se asigna según el nivel correspondiente de cada corrida del diseño experimental. La cara inferior de la lámina mantiene contacto potencial con la superficie de la matriz sin adhesión, lo que permite el deslizamiento libre durante la fase de descarga. Según Demeri (2013), la formulación Augmented Lagrange es preferible a la penalización pura en problemas de contacto con retorno elástico porque garantiza la impenetrabilidad sin introducir rigidez artificial que altere la distribución de esfuerzos residuales [26]. La Fig. 3 muestra la sección transversal del ensamble con las condiciones de frontera aplicadas.

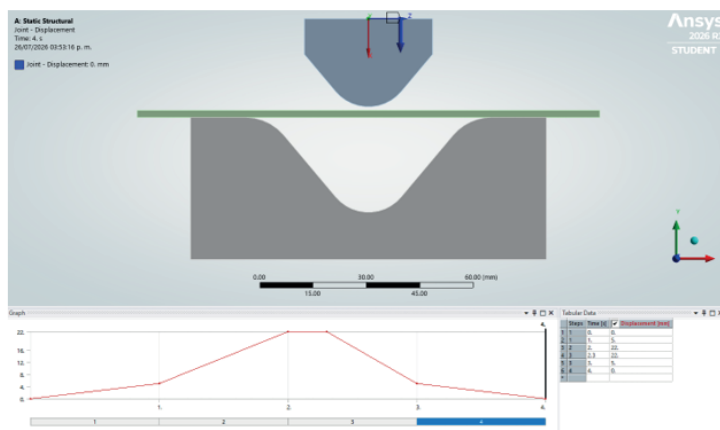


Fig. 3. Sección transversal del ensamble FEM en el plano de simetría XY con las condiciones de frontera del modelo. La matriz queda fija en todos sus grados de libertad mediante un Joint tipo Fixed-MPC y el punzón recibe desplazamiento prescrito en dirección Y negativa mediante un Joint tipo Translational-MPC. Contacto friccional Augmented Lagrange en ambas interfaces con rigidez normal $Kn = 0.1$. Cotas en milímetros. Elaboración propia. ANSYS Mechanical 2026 R1.

Los efectos inerciales se desactivan por tratarse de un análisis cuasi estático. El control de pasos emplea incrementos adaptativos con tolerancia Newton-Raphson estándar. El protocolo de carga se estructuró en cuatro pasos sucesivos que reproducen el ciclo completo de conformado y liberación. En el primer paso el punzón desciende hasta establecer contacto inicial con la lámina sin imponer deformación plástica significativa. El segundo paso completa el conformado mediante el descenso hasta la profundidad nominal correspondiente a la combinación geométrica de cada corrida, calculada mediante la fórmula de calibración del stroke para cada par (R_p , W). El tercer paso incluye un período breve de permanencia a profundidad máxima seguido de un retiro parcial, lo que estabiliza la solución de contacto antes de la descarga total. En el cuarto paso el punzón retorna a su posición inicial y libera completamente la lámina, lo que permite que el retorno elástico se desarrolle sin restricción cinemática. El ángulo residual θ se calcula al finalizar el cuarto paso mediante la Ec. (3), sobre selecciones nominales de nodos definidas en el brazo de la lámina. La Fig. 4 muestra la configuración deformada antes y después de la descarga, con la distribución de desplazamientos verticales.

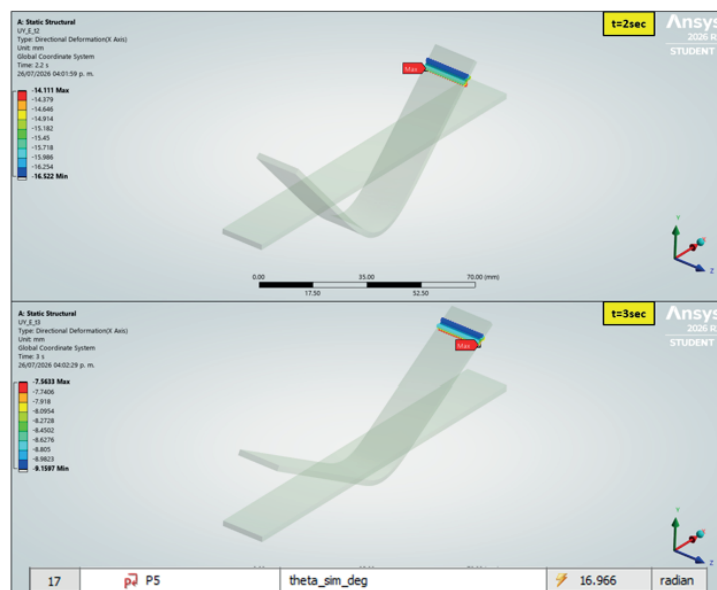


Fig. 4. Distribución de desplazamiento vertical UY en la lámina de CRMS1700 para el punto central del diseño. Configuración previa al retorno elástico (superior) y posterior a la descarga completa del punzón (inferior), con escala de colores en milímetros. El ángulo θ se calcula mediante la expresión geométrica de selecciones nominales con $L_{ref} = 36$ mm. Elaboración propia. ANSYS Mechanical 2026 R1.

La verificación numérica del modelo se ejecuta sobre cuatro niveles de refinamiento de malla, aplicados como Face Sizing sobre la lámina con tamaños característicos $h = 2.00, 1.00, 0.75$ y 0.50 mm, manteniendo Body Sizing fijo de 1.00 mm en punzón y matriz. Un quinto nivel proyectado con $h = 0.25$ mm no fue ejecutable por exceder el límite de nodos de la licencia académica empleada. La relación de aspecto de los elementos de la lámina se mantuvo constante entre niveles para asegurar que las diferencias observadas en la respuesta correspondan al tamaño característico y no a la calidad de malla. Los resultados del estudio y la aplicación del protocolo GCI descrito en las Ecs. (4) a (6) se presentan en la Sección IV.

La matriz del diseño Box-Behnken se configura con los rangos de los tres factores, establecidos a partir de las restricciones prácticas de la herramienta industrial y de los valores reportados en literatura para condiciones de proceso similares [4], [8], [16]. La codificación a variables adimensionales se realiza mediante la transformación lineal que mapea los niveles $-1, 0$ y $+1$ a los valores reales correspondientes:

$$x_1 = (R_p - 12)/4, x_2 = (W - 44)/12, x_3 = (\mu - 0.10)/0.05$$

donde R_p y W se expresan en milímetros y μ es adimensional. El radio de matriz se mantiene como variable dependiente $R_d = R_p + 2$ mm en todas las corridas, conforme al criterio de diseño de utillaje establecido. La Tabla IV resume la codificación de los factores, sus niveles y la matriz de trece corridas resultante del diseño.

TABLA IV.
CODIFICACIÓN DE FACTORES Y MATRIZ BOX-BEHNKEN DEL DOE

CODIFICACIÓN DE FACTORES:

Factor	Símbolo	Unidad	-1	0	+1
Radio de punzón	R_p	mm	8	12	16
Apertura de matriz	W	mm	32	44	56
Coef. de fricción	μ	-	0.05	0.10	0.15

MATRIZ DE 13 CORRIDAS BOX-BEHNKEN:

Corrida	$x_1 (R_p)$	$x_2 (W)$	$x_3 (\mu)$
1	-	-	0
2	+	-	0
3	-	+	0
4	+	+	0
5	-	0	-
6	+	0	-
7	-	0	+
8	+	0	+
9	0	-	-
10	0	+	-
11	0	-	+
12	0	+	+
0(C)	0	0	0

Nota. El punto central (C) se ejecuta una sola vez dado el carácter determinista del modelo FEM bajo configuración fija de malla, material, contacto y solver. La verificación de la estabilidad numérica se aborda mediante el protocolo GCI y no mediante réplicas estadísticas [22]. Elaboración propia.

Cada nivel codificado corresponde a una condición física distinta del proceso. Un mayor radio de punzón implica menor severidad de deformación en la zona del radio, una mayor apertura de matriz reduce la curvatura relativa impuesta a la lámina durante el formado, y el nivel superior de fricción corresponde a la condición de superficie seca sin lubricante añadido, mientras que el inferior representa superficie lubricada. Esta correspondencia es la que permite interpretar los coeficientes del modelo de regresión en términos de mecánica del proceso y no solo como magnitudes estadísticas.

Cada una de las trece corridas se ejecuta con la configuración FEM verificada en la fase previa, y la respuesta θ se registra al finalizar el paso de descarga. El conjunto de respuestas alimenta el procedimiento de ajuste del modelo polinómico de la Ec. (7) en Minitab. El procedimiento de regresión por pasos hacia atrás elimina secuencialmente los términos no significativos, preservando la jerarquía del modelo cuadrático conforme al criterio descrito en la Sección III.I, para garantizar la interpretabilidad física de los coeficientes [22].

IV. RESULTADOS

IV.I. CONVERGENCIA DE MALLA Y VERIFICACIÓN NUMÉRICA

La verificación numérica del modelo se ejecutó sobre la configuración del punto central del diseño ($R_p/t = 6, W = 44$ mm, $\mu = 0.10$), condición representativa del proceso donde el costo computacional permite el refinamiento sistemático que requiere el protocolo GCI. El estudio se diseñó originalmente sobre cinco niveles de refinamiento con tamaños característicos $h = \{2.00, 1.00, 0.75, 0.50, 0.25\}$ mm; sin embargo, la malla M4 alcanza 240,435 nodos y excede el límite de 128,000 nodos de la licencia ANSYS Student 2026 R1, por lo que no pudo ejecutarse. La Tabla V resume los cuatro niveles efectivamente evaluados.

TABLA V.
ESTUDIO DE CONVERGENCIA DE MALLA Y VERIFICACIÓN GCI

Malla	h (mm)	Nodos	θ_{sim} (°)	$\Delta\theta$ vs. M1	Estado
M0	2.00	14,561	17.818	+0.852° (+5.02%)	Mono
M1	1.00	26,931	16.966	(ref.)	Mono
M2	0.75	39,009	16.786	-0.180° (-1.06%)	Mono
M3	0.50	69,939	17.065	+0.099° (+0.58%)	Oscila
M4	0.25	240,435	-	-	-

Nota. Configuración de verificación: $R_p/t = 6, W = 44$ mm, $\mu = 0.10$. Face Sizing aplicado sobre la lámina; punzón y matriz con Body Sizing fijo de 1.0 mm. Elaboración propia. ANSYS Mechanical 2026 R1.

El análisis de los incrementos sucesivos muestra que las mallas M0, M1 y M2 presentan convergencia monótona con incrementos decrecientes del mismo signo, mientras que la malla M3 introduce un cambio de signo respecto a M2. Este comportamiento oscilatorio refleja la salida del régimen asintótico por refinamiento excesivo sobre las no linealidades del contacto y la descarga elástica, por lo que M3 se excluye del triplete de verificación conforme al criterio de Celik et al. [25]. El triplete válido queda definido por las mallas M0, M1 y M2, con razones de refinamiento no uniformes $r_{21} = h_1/h_2 = 1.333$ y $r_{32} = h_0/h_1 = 2.000$. Aplicando la Ec. (4), la razón de incrementos resulta:

$$R = \frac{|\varepsilon_{21} - \varepsilon_{32}|}{\varepsilon_{32}} = \frac{(16.966 - 16.786)}{(17.818 - 16.966)} = 0.180 / 0.852 = 0.211$$

valor que satisface la condición $0 < R < 1$ y confirma convergencia monótona del triplete, lo que habilita la aplicación formal del índice [21], [25]. Dado que las razones de refinamiento no son uniformes, el orden de convergencia aparente se determinó mediante resolución iterativa de la formulación de Schwer, obteniéndose $p = 1.319$. Este valor se sitúa por debajo del orden teórico nominal del elemento cuadrático SOLID186, resultado esperable en un problema que combina plasticidad y contacto friccional, donde la no linealidad de la solución degrada el orden efectivo respecto al régimen puramente elástico.

El error relativo entre las dos mallas más finas del triplete y el índice de convergencia se calculan mediante la Ec. (5):

$$e_{21} = \frac{(16.966 - 16.786)}{16.786} = 1.072\%$$

$$[GCI]_{21} = 1.25 \cdot 0.01072 / ([1.333]^{1.319-1}) \times 100\% \approx 2.906\%$$

El valor $GCI_{21} = 2.906\%$ cumple el criterio de aceptación establecido de 5% para la malla seleccionada. La extrapolación de Richardson, mediante la Ec. (6), estima la solución numéricamente convergida:

$$\theta^* = 16.786 - 0.180 / ([1.333]^{1.319-1}) \approx 16.396^\circ$$

con lo que el error de discretización absoluto de la malla M1 respecto a la solución extrapolada es de 0.570° . Esta magnitud representa una fracción menor de la amplitud total de respuesta del diseño experimental, que abarca 8.57° entre sus extremos, lo que sostiene que las diferencias observadas entre puntos del diseño reflejan efectos reales del proceso y no artefactos numéricos. La banda de confianza al 95% asociada a la malla seleccionada se construye como $\theta(1 \pm GCI_{21})$, resultando el intervalo $[16.473^\circ, 17.459^\circ]$. La Fig. 5 muestra la evolución de θ_{sim}

con el tamaño característico de malla y el número de nodos correspondiente.

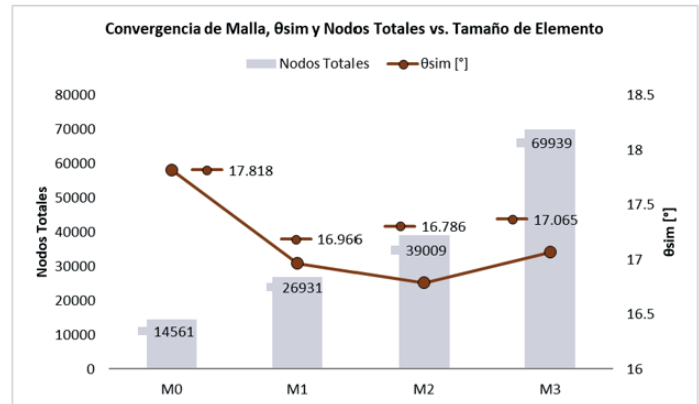


Fig. 5. Convergencia de malla del modelo FEM en la configuración de verificación. Se grafica θ_{sim} y el número total de nodos en función del tamaño característico h para los cuatro niveles M0 a M3. El triplete válido para la aplicación del índice queda definido por M0, M1 y M2; la malla M3 se excluye por salida del régimen asintótico. Elaboración propia.

La malla M1 con $h = 1.00$ mm se adoptó como configuración operativa para la ejecución del diseño Box-Behnken. Aunque M2 constituye la solución más refinada del triplete, la diferencia relativa entre ambas es de apenas 1.072% y el costo computacional de M2 resulta 1.45 veces mayor. Esta decisión privilegia la viabilidad computacional del diseño completo de trece corridas sin comprometer la independencia de malla numéricamente verificada.

El índice obtenido merece una lectura comparativa. Un GCI de 2.906% es superior a los valores que suelen reportarse en problemas puramente elásticos, donde es habitual alcanzar valores inferiores al 1%. Sin embargo, el presente modelo incorpora de forma simultánea plasticidad con endurecimiento multilinear, contacto friccional con formulación Augmented Lagrange y una fase de descarga elástica donde se resuelve el fenómeno de interés. Cada una de estas fuentes de no linealidad contribuye a la incertidumbre de discretización, de modo que el valor obtenido es consistente con el orden de magnitud esperado para esta clase de problemas [25]. Más relevante que la magnitud absoluta del índice es su comparación con la tolerancia de la aplicación: un error de discretización de 0.570° se mantiene por debajo del margen que exige el control dimensional de componentes estampados según las especificaciones genéricas de referencia [3].

IV.II. DISEÑO BOX-BEHNKEN

Las trece corridas del diseño se ejecutaron con la malla M1 verificada en la Sección IV.I, manteniendo constantes las propiedades constitutivas de las Tablas II y III, la formulación de contacto Augmented Lagrange y el protocolo cuasi

estático de cuatro pasos. El stroke se calculó mediante la fórmula de calibración geométrica correspondiente a cada combinación de radio de punzón y apertura de matriz. La Tabla VI resume los valores reales de los tres factores junto con la respuesta θ_{sim} registrada al finalizar el paso de descarga elástica.

TABLA VI.
MATRIZ BOX-BEHNKEN CON RESPUESTAS θ_{sim}

DP	R_p (mm)	W (mm)	μ	θ_{sim} (°)
1	8	32	0.10	19.899
2	16	32	0.10	22.441
3	8	56	0.10	13.869
4	16	56	0.10	14.112
5	8	44	0.05	19.257
6	16	44	0.05	17.472
7	8	44	0.15	17.601
8	16	44	0.15	18.961
9	12	32	0.05	21.063
10	12	56	0.05	13.993
11	12	32	0.15	20.160
12	12	56	0.15	16.218
13(C)	12	44	0.10	16.966

Nota. Corridas ejecutadas sobre la malla M1 verificada con $GCI_{L1} = 2.906\%$. DP13 corresponde al punto central del diseño. Elaboración propia.

equivalente al 50.5% del valor del punto central. Esta magnitud confirma sensibilidad significativa dentro del espacio experimental y, comparada con el error de discretización de 0.570° establecido en la Sección IV.I, indica una relación señal a ruido numérico superior a quince, condición que sostiene la interpretación estadística posterior.

El valor del punto central, $\theta_{sim} = 16.966^\circ$, resulta coherente con la física del material. Kim et al. documentaron retornos elásticos de hasta 31.6° en doblado en V de acero martensítico de 1,470 MPa con radio de punzón grande [27], de modo que la escala observada en el presente trabajo responde al comportamiento esperado para esta clase de aceros y no a una anomalía del modelo. La magnitud absoluta es considerablemente mayor que la reportada para aceros AHSS de menor resistencia, consecuencia directa de la relación σ_y/E_{ef} establecida en la Sección III.II.

Una lectura preliminar de la matriz permite anticipar el comportamiento que el análisis estadístico formaliza. Las corridas del bloque X_1X_2 , donde la fricción permanece en su nivel central, muestran que el paso de apertura mínima a máxima reduce el ángulo en 6.030° para radio de punzón bajo (DP1 a DP3) y en 8.329° para radio alto (DP2 a DP4), evidencia de que el efecto de la apertura no es independiente de la geometría del punzón. Más revelador resulta el bloque X_1X_3 , donde la fricción varía con apertura fija: al aumentar la fricción, el ángulo disminuye 1.656° con

radio de punzón bajo (DP5 a DP7) pero aumenta 1.489° con radio alto (DP6 a DP8). La inversión del signo del efecto según el nivel geométrico constituye la manifestación directa de una interacción, y anticipa que la fricción no puede tratarse como un factor de contribución aditiva independiente.

Estas observaciones son cualitativas y se formalizan mediante el ajuste del modelo de superficie de respuesta en la Sección IV.III.

IV.III. ANÁLISIS DE SUPERFICIE DE RESPUESTA Y REDUCCIÓN DE θ

El ajuste del modelo cuadrático completo de la Ec. (7) se ejecutó en Minitab Statistical Software v.22 con $\alpha = 0.05$, sobre los trece puntos del diseño y con nueve términos predictores: tres efectos lineales, tres cuadráticos puros y tres interacciones de dos factores. El modelo completo resultó globalmente significativo ($F = 17.03$, $p = 0.003$) con $R^2 = 96.84\%$ y $R^2(\text{adj}) = 91.15\%$. Sin embargo, la diferencia de 41.71 puntos porcentuales respecto a $R^2(\text{pred}) = 49.44\%$ excede ampliamente el umbral de 0.20 en proporción que Myers et al. señalan como indicador de sobreajuste en superficies de respuesta [22], lo que motivó la reducción sistemática del número de parámetros.

El examen de los valores de probabilidad individuales mostró que, de los nueve términos, únicamente el efecto lineal de la apertura de matriz alcanzaba significancia convencional ($p < 0.001$). De los ocho restantes, tres se ubicaron en zona marginal próxima al umbral: la curvatura pura de la fricción ($p = 0.097$) y las interacciones $R_p \times \mu$ ($p = 0.097$) y $W \times \mu$ ($p = 0.098$). Los tres términos con valores claramente no significativos y sin participación en interacciones marginales, R_p^2 ($p = 0.236$), W^2 ($p = 0.859$) y $R_p \times W$ ($p = 0.196$), fueron eliminados. Los tres términos marginales se conservaron por su proximidad al umbral convencional, lo que exigió retener también, por el principio de jerarquía, los efectos lineales de R_p y μ aun cuando individualmente no fueran significativos.

La comparación entre ambos modelos confirma que la reducción resuelve el sobreajuste detectado. $R^2(\text{pred})$ mejora de 49.44% a 75.40%, una ganancia de 25.96 puntos porcentuales en capacidad predictiva, mientras que $R^2(\text{adj})$ se mantiene prácticamente estable al pasar de 91.15% a 90.00% y la desviación estándar del error aumenta de forma marginal de 0.7701° a 0.8189° , costo aceptable frente a la mejora obtenida. La Fig. 6 presenta el análisis de varianza del modelo reducido.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	88.4771	14.7462	21.99	0.000
Linear	3	81.3239	27.1080	40.42	0.000
Rp	1	0.6962	0.6962	1.04	0.338
W	1	80.4610	80.4610	119.99	0.000
μ	1	0.1668	0.1668	0.25	0.631
Square	1	2.2344	2.2344	3.33	0.105
μ^2	1	2.2344	2.2344	3.33	0.105
2-Way Interaction	2	4.9189	2.4594	3.67	0.074
Rp $\times\mu$	1	2.4728	2.4728	3.69	0.091
W $\times\mu$	1	2.4461	2.4461	3.65	0.093
Error	8	5.3647	0.6706		
Lack-of-Fit	6	5.3647	0.8941	*	*
Pure Error	2	0.0000	0.0000		
Total	14	93.8418			

Fig. 6. Análisis de varianza del modelo de superficie de respuesta cuadrático reducido para el ángulo de retorno elástico θ_{sim} . La falta de ajuste no puede calcularse porque el error puro es estructuralmente cero en simulación determinista. Desviación estándar del error residual $S = 0.8189^\circ$. Elaboración propia. Minitab Statistical Software v.22.

El modelo reducido es globalmente significativo ($F = 21.99$, $p < 0.001$, con seis grados de libertad para el modelo y ocho para el error residual). Los factores de inflación de varianza unitarios para todos los términos confirman la ausencia de multicolinealidad, condición garantizada por la ortogonalidad del diseño Box-Behnken en variables codificadas. La ecuación de predicción en variables codificadas es:

$$\theta = 17.317 + 0.295x_1 - 3.171x_2 + 0.144x_3 + 0.774x_3^2 + 0.786x_1x_3 + 0.782x_2x_3$$

donde x_1 , x_2 y x_3 son las variables codificadas definidas en la Ec. (10). En unidades reales de proceso, la expresión equivalente permite el cálculo directo sin transformación previa:

$$\theta = 41.32 - 0.319R_p - 0.395W - 163.5\mu + 309\mu^2 + 3.930R_p\mu + 1.303W\mu$$

Ambas expresiones son válidas únicamente dentro del espacio experimental evaluado: R_p [8, 16] mm, W [32, 56] mm y μ [0.05, 0.15]. La extrapolación fuera de estos rangos no cuenta con respaldo en los datos del diseño [22].

Tres resultados estadísticos definen el comportamiento del retorno elástico. El primero es la dominancia inequívoca de la apertura de matriz, único término que alcanza significancia individual convencional ($F = 119.99$, $p < 0.001$) con coeficiente codificado $\beta_2 = -0.9023$ en escala normalizada respecto al efecto total. El signo negativo confirma que el incremento de la apertura reduce el retorno elástico: una mayor apertura disminuye la curvatura impuesta a la lámina durante el formado y, con ello, el gradiente de deformación

elástica entre fibras interna y externa que actúa como motor del fenómeno.

El segundo resultado es el comportamiento no monótono de la fricción. El coeficiente de curvatura pura $\beta_{33} = +0.774$ indica que el efecto de la fricción sobre el retorno elástico no crece ni decrece de forma constante dentro del rango evaluado, sino que existe una condición intermedia donde el comportamiento cambia de dirección.

El tercer resultado desarrolla el anterior. Las dos interacciones retenidas, $R_p \times \mu$ (+0.786) y $W \times \mu$ (+0.782), presentan magnitud comparable entre sí y del mismo orden que el efecto lineal de la geometría, lo que implica que el efecto del radio de punzón y de la apertura sobre el retorno elástico depende del nivel de fricción presente. La observación cualitativa anticipada en la Sección IV.11, donde el signo del efecto de la fricción se invertía según el nivel del radio de punzón, queda así formalizada. Según Myers et al., la presencia de interacciones significativas implica que los factores involucrados no pueden optimizarse de manera independiente y que la superficie de respuesta tiene geometría no separable que requiere análisis simultáneo de las variables interactuantes [22]. La Fig. 7 muestra el gráfico de contorno de la respuesta en el plano geométrico, evaluado en la condición de superficie seca correspondiente al utillaje construido.

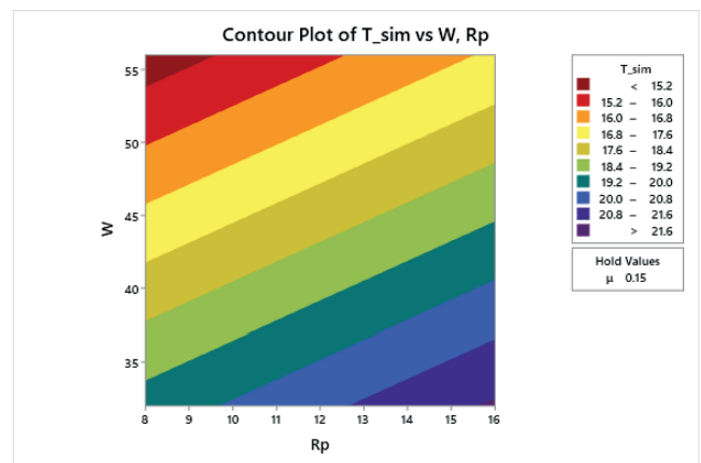


Fig. 7. Gráfico de contorno de θ_{sim} en función de la apertura de matriz W y del radio de punzón R_p , con coeficiente de fricción fijo en $\mu = 0.15$. Las líneas de nivel son aproximadamente rectas y paralelas, consistente con la ausencia de los términos R_p^2 y $R_p \times W$ en el modelo reducido. La región de mínimo retorno elástico se ubica hacia radio de punzón bajo y apertura alta; la de máximo, hacia radio alto y apertura baja. Elaboración propia. Minitab Statistical Software v.22.

Este hallazgo matiza la interpretación predominante en la literatura. Karabulut et al. reportaron la no significancia de la fricción en doblado en V de SCGADUB1180 bajo lubricación industrial [4] y Asmael et al. la ubicaron en el último lugar de la jerarquía de factores en AA5052 [8]. Los presentes resultados no contradicen esas observaciones en cuanto al efecto lineal, que efectivamente resulta despreciable, pero muestran que una conclusión de no significancia basada únicamente en el término lineal puede omitir contribuciones relevantes cuando el diseño experimental permite estimar curvatura e interacciones. La consecuencia práctica es que el número de variables de ajuste relevantes para el control dimensional se mantiene en tres, no en dos.

La calidad predictiva del modelo se evaluó mediante tres métricas complementarias: $R^2 = 94.28\%$, $R^2(\text{adj}) = 90.00\%$ y $R^2(\text{pred}) = 75.40\%$, este último calculado por validación cruzada de tipo leave-one-out mediante el estadístico PRESS. La diferencia de 14.60 puntos porcentuales entre las dos últimas se mantiene dentro del criterio de concordancia de 0.20 en proporción aceptado en la práctica de superficies de respuesta, lo que indica ausencia de sobreajuste severo [22]. El diagnóstico de observaciones inusuales identificó a DP2 como la única con residuo estandarizado fuera del rango de ± 2.0 , con valor de +2.60, donde el modelo subestima la respuesta en 1.658° . Al no existir evidencia de error en la ejecución de esa simulación y estar su influencia limitada por el balance del diseño, la observación se conservó en el análisis, conforme al criterio de que residuos estandarizados entre 2.0 y 3.0 en diseños de pequeño tamaño muestral no justifican eliminación salvo evidencia independiente de error experimental [22].

La optimización de la respuesta se ejecutó mediante la función Response Optimizer con objetivo de minimización. Sin restricciones adicionales, el óptimo dentro del espacio experimental se ubica en $R_p = 16$ mm, $W = 56$ mm y $\mu = 0.05$, con $\theta_{\text{pred}} = 13.50^\circ$, lo que representa una reducción de 20.4% respecto al punto central del diseño. Esta condición no corresponde a un mínimo matemático del polinomio, cuyo punto estacionario se localiza fuera de la región experimental, sino a la solución de menor respuesta sobre la frontera del espacio evaluado.

Dado que la selección del radio de punzón está sujeta a restricciones de disponibilidad de herramental, se caracterizó también el desempeño bajo una geometría más conservadora. Restringiendo el radio a 8 mm y dejando libre la fricción, el óptimo se ubica en $W = 56$ mm con $\mu = 0.0955$ y $\theta_{\text{pred}} = 13.844^\circ$ [IC95%: 12.656° , 15.032°], condición

de mayor severidad tribológica dentro del rango, correspondiente a superficie seca. En $R_p = 8$ mm, $W = 56$ mm y $\mu = 0.15$ la predicción asciende a $\theta_{\text{pred}} = 14.764^\circ$ [IC95%: 12.876° , 16.652°], un incremento de apenas 0.92° respecto al óptimo con lubricación.

Este último resultado es favorable desde una perspectiva de robustez de proceso: incluso en la condición de fricción más adversa del rango evaluado, la penalización en retorno elástico es moderada, lo que sugiere que el control dimensional no depende críticamente de una lubricación estrictamente consistente. Esta condición, correspondiente al utillaje efectivamente construido, es la que se somete a validación experimental en la Sección IV.IV.

IV.VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

La validación experimental constituye la etapa final de la cadena predicción-validación del trabajo. Su objetivo es contrastar la predicción del modelo FEM calibrado contra una medición física directa, bajo la condición de proceso que corresponde al utillaje realmente construido.

A.Utillaje y Condiciones de Ensayo

El ensayo se ejecutó sobre el utillaje físico correspondiente a la condición $R_p = 8$ mm y $W = 56$ mm, con matriz de ángulo 100° . El punzón y la matriz se fabricaron en acero 4140 templado a dureza 56/58 RC. La Fig. 8 presenta el plano de fabricación del dispositivo, con el detalle del ángulo de cavidad que materializa el sobredoblado intencional descrito en la Sección III.I.

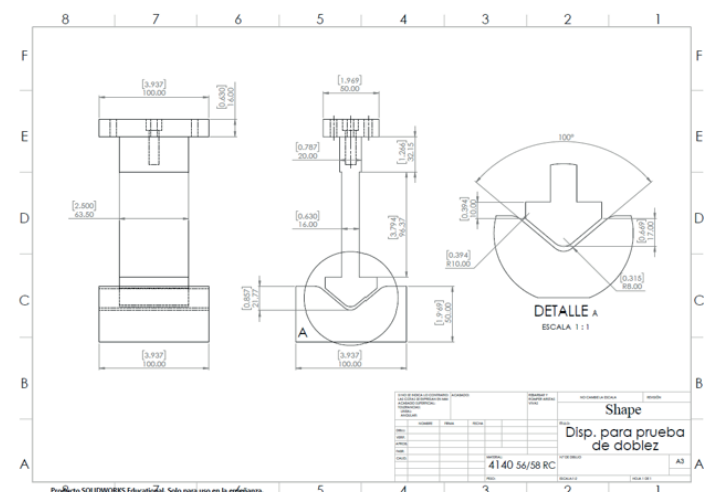


Fig. 8. Plano de fabricación del dispositivo de prueba de doblado en V. El detalle muestra el ángulo de matriz de 100° correspondiente al sobredoblado intencional. Material: acero 4140 templado a dureza 56/58 RC. Cotas en milímetros. Elaboración propia.

Las probetas se cortaron con dimensión nominal de 130 mm de largo por 30 mm de ancho, conservando el espesor original de 2.0 mm, en tres orientaciones respecto a la dirección de laminación: 0°, 45° y 90°, con tolerancia angular de $\pm 1^\circ$. Los bordes se desbarbaron sin rebabas ni deformación de corte, y se verificó la ausencia de marcas profundas, golpes o sobrecalentamiento atribuibles al proceso de corte, condiciones que podrían introducir tensiones residuales adicionales ajenas al estado de recepción del material.

El ensayo se realizó sin lubricante añadido, condición seca correspondiente al nivel $\mu = 0.15$ según la convención establecida en la Sección III.III. La carga se aplicó en una máquina universal de ensayos Zwick/Roell con celda de carga de capacidad nominal 100 kN y velocidad de desplazamiento de 5 mm/s.

B. Instrumentación y Protocolo de Medición

La lectura del ángulo se obtuvo mediante un sistema de microscopía óptica Qeye 800, con certificado de calibración vigente al momento del ensayo, y software de medición angular que opera directamente sobre la imagen capturada del espécimen.

El ángulo de retorno elástico se calculó como la diferencia entre el ángulo interior de la probeta tras la descarga completa y el ángulo bajo carga registrado de forma individual para cada espécimen. Este último varió entre 99.0° y 100.0° según la probeta, debido a que la carrera de la prensa no fue idéntica en todas las corridas. El cálculo contra el ángulo cargado real de cada espécimen, y no contra un valor nominal fijo, evita atribuir a retorno elástico las variaciones de carrera del equipo, y explica parte de la dispersión observada entre probetas. La Fig. 9 muestra las probetas tras el ensayo con sus lecturas individuales.

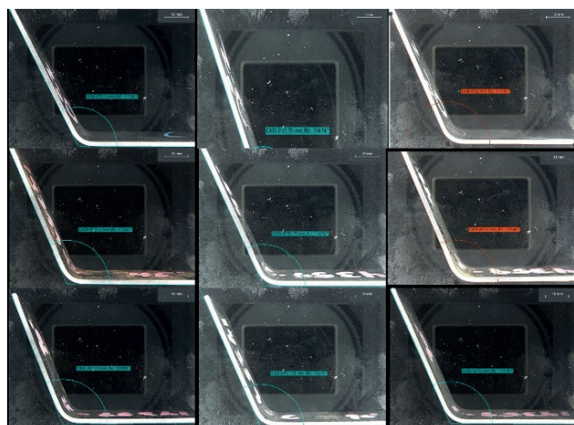


Fig. 9. Probetas de doblado en V tras el ensayo, con las lecturas individuales del ángulo resultante anotadas para cada espécimen. Elaboración propia.

C. Resultados Experimentales

Se ensayaron nueve probetas, tres por cada dirección de laminación evaluada. La Tabla VII presenta los resultados por dirección.

TABLA VII.
RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL ÁNGULO DE RETORNO ELÁSTICO
POR DIRECCIÓN DE LAMINACIÓN

Dirección	Rép. 1 [°]	Rép. 2 [°]	Rép. 3 [°]	Media [°]	s [°]
0°	17.460	14.150	15.140	15.583	1.699
45°	14.640	13.340	14.940	14.307	0.850
90°	14.380	11.940	14.210	13.510	1.362
Global				14.467	1.479

Nota. Condición de ensayo: $R_p = 8$ mm, $W = 56$ mm, $\mu = 0.15$ sin lubricante. Intervalo de confianza al 95% del valor global: [13.330°, 15.603°]. Elaboración propia.

El resultado global, agrupando las nueve mediciones, es $\theta_{exp} = 14.467^\circ$ con desviación estándar de 1.479° e intervalo de confianza al 95% de [13.330°, 15.603°], sobre un rango observado de 11.940° a 17.460°. El coeficiente de variación de 10.2% es consistente con lo esperable en ensayos de doblado sobre lámina de ultra alta resistencia, donde la dispersión proviene de la combinación de tolerancias de corte, variación de carrera de prensa y heterogeneidad local del material.

El análisis de varianza de un factor sobre la dirección de laminación arrojó $F = 1.801$ con $p = 0.244$, de modo que la dirección no resulta significativa al 95% de confianza. La dispersión dentro de cada dirección, con desviación agrupada de 1.350° , es del mismo orden que la separación entre las medias de las tres direcciones. Este resultado respalda con evidencia experimental directa, y no solo con el argumento analítico de $\Delta r = 0$ establecido en la Sección III.II, la decisión metodológica de excluir la dirección de laminación como factor del diseño experimental. La hipótesis planteada en la caracterización constitutiva queda así verificada de forma independiente.

D. Contraste entre Predicción y Medición

El modelo FEM calibrado, evaluado exactamente en la condición física ensayada, predice $\theta_{sim} = 14.764^\circ$ con intervalo de confianza al 95% de [12.876°, 16.652°], según se estableció en la Sección IV.III. El contraste contra la media experimental arroja un error absoluto de predicción $KPI1 = 0.297^\circ$ y un error relativo $KPI2 = 2.053\%$, conforme a los indicadores definidos en la Ec. (8), muy por debajo del criterio de aceptación de 5% establecido en la Sección III.I.

El aspecto más relevante del resultado no es la magnitud del error en sí, sino su comparación con la incertidumbre propia del modelo: el error de predicción de 2.053% es inferior al

índice de convergencia de malla de 2.906% establecido en la Sección IV.I. Dicho de otro modo, la discrepancia entre simulación y realidad física es menor que la incertidumbre que aporta, por sí sola, la discretización espacial del modelo. Esto indica que la diferencia observada no refleja un sesgo sistemático del modelo constitutivo, sino que se mantiene dentro del orden de magnitud de las incertidumbres numéricas ya reconocidas y declaradas.

La concordancia es además estadística y no solo puntual. La media experimental se ubica cómodamente dentro del intervalo de confianza de la predicción, y de forma recíproca la predicción se sitúa dentro del intervalo de confianza experimental de $[13.330^\circ, 15.603^\circ]$, condición de superposición mutua que sostiene que ambas estimaciones son compatibles con un mismo valor verdadero de la respuesta.

Situado frente a los antecedentes, el resultado es competitivo. Karabulut et al. reportaron desviaciones del orden de 0.5° a 1.5° entre predicción y medición en doblado en V de acero avanzado de alta resistencia [4], rango dentro del cual se ubica con holgura el error absoluto de 0.297° obtenido en el presente trabajo, sobre un material de clase de resistencia superior. Con esta validación, el modelo FEM de doblado en V completa la secuencia de verificación numérica, análisis de sensibilidad y validación experimental cuantitativa que Ferziger et al. establecen como protocolo mínimo de credibilidad para un modelo computacional de ingeniería [28].

V. DISCUSIÓN

El orden de convergencia aparente $p = 1.319$ se sitúa por debajo del orden teórico nominal del elemento SOLID186, resultado coherente con la naturaleza del problema: la teoría de convergencia asintótica presupone un operador lineal y una solución regular, condiciones que el doblado en V no satisface, pues la plasticidad introduce una discontinuidad en la relación constitutiva al cruzar la superficie de fluencia y el contacto friccional una condición de frontera no diferenciable. En el mismo sentido debe leerse la exclusión de la malla M3, cuyo comportamiento oscilatorio corresponde a la advertencia de Burchitz sobre la sensibilidad del retorno elástico ante el refinamiento excesivo en la zona de contacto, donde la rigidez numérica de la formulación Augmented Lagrange perturba la solución al aproximarse el tamaño de elemento a la tolerancia de penetración [2]. El índice $GCI_{121} = 2.906\%$, superior al habitual en elasticidad lineal pero consistente con problemas

que combinan plasticidad, contacto y descarga [25], se traduce en un error de discretización de 0.570° sobre una amplitud de respuesta de 8.572° , fracción menor del efecto que se busca cuantificar. La lección metodológica es que un refinamiento mayor no equivale necesariamente a una solución más precisa, y que la verificación formal es el instrumento que permite distinguir ambas situaciones.

La reducción del modelo completo al de seis términos ilustra una tensión característica de los diseños de segundo orden con tamaño muestral reducido. El modelo completo ofrecía mejor ajuste dentro de la muestra ($R^2 = 96.84\%$) pero capacidad predictiva deficiente ($R^2(\text{pred}) = 49.44\%$), configuración típica de sobreajuste donde el modelo describe el ruido en lugar de la estructura del proceso. La ganancia de 25.96 puntos porcentuales tras la reducción, con deterioro marginal del ajuste, confirma que los términos eliminados no representaban mecanismos físicos. El valor final de $R^2(\text{pred}) = 75.40\%$ es inferior al reportado por Asmael et al. en AA5052 [8] y por Karakaya y Erdoğan en AA7075-T6 [15], diferencia atribuible a que ambos operan sobre aleaciones de aluminio con relación σ_y/E considerablemente menor, donde la respuesta es más suave y el modelo cuadrático la captura con mayor facilidad.

La dominancia de la apertura de matriz ($F = 119.99$) admite lectura mecánica directa: una mayor apertura reduce la curvatura impuesta a la lámina y con ella el gradiente de deformación elástica entre fibras interna y externa que constituye el motor del fenómeno. Esta jerarquía difiere de la secuencia $R_p > W > \mu$ documentada por Asmael et al. [8] y de la sensibilidad dominante del radio de punzón identificada por Carden et al. [10], discrepancia atribuible a las configuraciones de proceso, pues estos últimos trabajaron sobre doblado bajo tensión donde la tracción superpuesta modifica el estado de esfuerzos. A ello se suma que la elevada relación σ_y/E_{ef} del CRMS1700 amplifica la componente elástica recuperada durante la descarga, lo que incrementa la sensibilidad de θ frente a la longitud del brazo de momento gobernada por W .

El hallazgo sobre la fricción constituye la contribución original del trabajo. La literatura converge en tratarla como factor de segundo orden: Karabulut et al. reportaron su no significancia bajo lubricación industrial [4], Asmael et al. la ubicaron en el último lugar de la jerarquía [8] y Burchitz la caracteriza como perturbación frente al momento flector en doblado puro [2]. Los presentes resultados no contradicen esas observaciones respecto al efecto lineal, que en efecto

resulta no significativo, pero muestran que una conclusión de irrelevancia basada solo en ese término puede omitir contribuciones reales cuando el diseño permite estimar curvatura e interacciones. Los tres términos asociados a la fricción se agrupan de forma consistente entre $p = 0.09$ y $p = 0.11$, patrón difícilmente atribuible a ruido aleatorio, y ambas interacciones presentan magnitud comparable a los efectos lineales de la geometría. La condición de lubricación incide entonces sobre el proceso de forma no lineal, de modo que su optimización, y no simplemente su maximización o minimización, debe considerarse en el control dimensional.

El error relativo de 2.053% adquiere su significado pleno al compararse con la incertidumbre interna del modelo: al resultar inferior al índice de convergencia de malla, la discrepancia entre simulación y realidad física es menor que la que aporta la propia discretización espacial, lo que permite descartar un sesgo sistemático del modelo constitutivo y sugiere que la incorporación del módulo efectivo de descarga y el anclaje de la ley de Swift a dos puntos certificados capturan adecuadamente el comportamiento del material. La confirmación experimental de la isotropía planar ($F = 1.801$, $p = 0.244$) tiene alcance que trasciende este estudio, pues si la direccionalidad no incide significativamente en aceros martensíticos de esta clase, el diseño experimental necesario para caracterizarlos puede reducirse sustancialmente. Tres limitaciones delimitan el alcance de estos resultados: los coeficientes de Lankford provienen de literatura y no de ensayos sobre el lote [4]; el estadístico de falta de ajuste no es calculable por ser el error puro estructuralmente nulo en simulación determinista [22]; y la validación se ejecutó sobre una única condición de proceso, la correspondiente al utillaje disponible. Ninguna invalida los resultados, pero las tres precisan el dominio dentro del cual pueden sostenerse.

VI. CONCLUSIONES

El presente trabajo desarrolló, verificó y validó experimentalmente un modelo de elementos finitos con criterio Hill-48 en tensión plana para la predicción del ángulo de retorno elástico en doblado en V de acero martensítico CRMS1700 de 2.0 mm de espesor, conformado sobre matriz de 100° con sobredoblado intencional. Los hallazgos se resumen en cinco puntos.

Primero, el certificado siderúrgico del lote constituye una fuente suficiente para la caracterización constitutiva de un acero martensítico de ultra alta resistencia destinado a

modelado de retorno elástico. La ley de Swift con offset de deformación ($K = 2,264.8$ MPa, $n = 0.07$, $\epsilon_0 = 0.003143$), calibrada mediante criterio de Considère y anclada simultáneamente al esfuerzo de fluencia y a la resistencia última certificados, reprodujo el comportamiento del material sin requerir campañas propias de ensayos uniaxiales. La incorporación del módulo efectivo de descarga $E_{ef} = 193,200$ MPa, que recoge la degradación cuasi plástica elástica, evita la subestimación sistemática que introduce el empleo de la rigidez nominal.

Segundo, el modelo satisface el criterio de independencia de malla con un índice de convergencia $GCI_{21} = 2.906\%$, calculado sobre un triplete que cumple la condición de convergencia monótona ($R = 0.211$) con orden de convergencia aparente $p = 1.319$ y solución extrapolada por Richardson $\theta^* = 16.396^\circ$. La malla más fina evaluada abandona el régimen asintótico e introduce comportamiento oscilatorio, lo que confirma que en problemas con plasticidad y contacto friccional un refinamiento mayor no equivale necesariamente a una solución más precisa, y que la verificación formal es el instrumento que permite distinguir ambas situaciones.

Tercero, la apertura de matriz es el factor dominante sobre el retorno elástico ($F = 119.99$, $p < 0.001$), con efecto de signo negativo y magnitud considerablemente superior a la de los demás términos del modelo. El coeficiente de fricción, en contraste con la interpretación predominante en la literatura de doblado en V, no puede tratarse como variable despreciable: su contribución se manifiesta mediante curvatura no monótona y dos interacciones con la geometría del utillaje, de magnitud comparable a los efectos lineales. Este resultado constituye la contribución original del trabajo y mantiene en tres, y no en dos, el número de variables relevantes para el control dimensional del proceso. El modelo reducido de seis términos alcanzó $R^2 = 94.28\%$, $R^2(\text{adj}) = 90.00\%$ y $R^2(\text{pred}) = 75.40\%$, con condición de mínimo retorno elástico en $R_p = 16$ mm, $W = 56$ mm y $\mu = 0.05$ ($\theta_{\text{pred}} = 13.50^\circ$), equivalente a una reducción de 20.4% respecto al punto central del diseño.

Cuarto, la validación experimental sobre nueve probetas distribuidas en tres direcciones de laminación arrojó $\theta_{\text{exp}} = 14.467^\circ \pm 1.479^\circ$ frente a los 14.764° predichos por el modelo evaluado en la misma condición, con error relativo $KPI2 = 2.053\%$, inferior tanto al criterio de aceptación establecido como a la propia incertidumbre de discretización del modelo.

Quinto, el marco integrado de caracterización trazable, verificación numérica formal, análisis de sensibilidad y validación experimental demuestra que el retorno elástico del CRMS1700 es predecible y compensable dentro de un margen conocido. Este resultado remueve el obstáculo técnico principal que hoy limita la adopción de aceros martensíticos de esta clase de resistencia en componentes estructurales de carrocería, lo que abre la ruta hacia la sustitución de grados de menor resistencia y mayor espesor. Una estimación ilustrativa sobre una pieza de referencia comparable, con reducción de espesor de 1.6 mm a 1.4 mm y volumen de 235,000 piezas anuales, representaría un ahorro de material del orden de 0.872 kg por pieza y una reducción de masa de 0.826 kg por pieza terminada.

Como extensiones naturales del trabajo se plantean la medición directa de los coeficientes de Lankford sobre el lote específico según ASTM E517, la ampliación de la validación a más de una condición de proceso, y la exploración del comportamiento no monótono de la fricción mediante un diseño orientado específicamente a ese factor.

REFERENCIAS

[1] Keeler, S., & Kimchi, M. (2017). Advanced high-strength steels application guidelines (V6.0 ed.). WorldAutoSteel.

[2] Burchitz, I. (2008). Improvement of springback prediction in sheet metal forming. Doctoral thesis, University of Twente. doi:10.3990/1.9789036526562

[3] Ford Motor Company. (2017). Global generic tolerances for sheet metal components. FOMOCO.

[4] Karabulut, S., Esen, I., & Şahin, E. (2024). Springback prediction performance and experimental analysis in the V-bending process of SCGADUB1180 advanced high-strength steel. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 18(2), 441-453. doi:10.59038/jjmie/180216

[5] Choi, M., & Huh, H. (2014). Effect of punch speed on amount of springback in U-bending process of auto-body steel sheets. *Procedia Engineering*, 81, 963-968. doi:10.1016/j.proeng.2014.10.125.

[6] Sun, L., & Wagoner, R. (2011). Complex unloading behavior: Nature of the deformation and its consistent constitutive representation. *International Journal of Plasticity*, 27, 1126–1144. doi:10.1016/j.ijplas.2010.12.003

[7] Hill, R. (1948). A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 193(1033), 281–297. doi:10.1098/rspa.1948.0045

[8] Asmael, M., Fubara, O., & Nasir, T. (2023). Prediction of springback behavior of vee bending process of AA5052 aluminum alloy sheets using machine learning. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 17(1), 1-14. doi:10.59038/jjmie/170101

[9] Hosford, W., & Caddell, R. (2007). *Metal forming: Mechanics and metallurgy* (3rd ed.). Cambridge University Press.

[10] Carden, W., Geng, L., Matlock, D., & Wagoner, R. (2002). Measurement of springback. *International Journal of Mechanical Sciences*, 44(1), 79–101. doi:10.1016/S0020-7403(01)00082-0

[11] Panich, S., & Uthaisangsuk, V. (2015). Influences of yield criteria on stress-based forming limit diagram of DP980 steel. *Proceedings of COMPLAS XIII*, 734–744. CIMNE.

[12] Zhang, Y., Zhang, Q., & Sun, Y. (2018). Implementation issues of Yld2000-2d model under larger biaxial yield stress. *Mechanics & Industry*, 19, 501. doi:10.1051/meca/2018031

[13] Toros, S. (2016). Parameters determination of Yoshida–Uemori model through optimization process of cyclic tension–compression test and V-bending springback. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 13, 1893–1911. doi:10.1590/1679-78252916

[14] Seo, S., Kin, S., & Lee, M. (2018). Constitutive modeling for springback: Comparison of hardening laws combined with Yld2000-2d. *Metals*, 8, 18. doi:10.3390/met8010018

[15] Karakaya, Ç., & Erdoğan, S. (2025). Investigation of springback behavior of aluminum sheet metal in V-shaped bending with finite element analysis. *Applied Sciences*, 15, 5509.

[16] Wasif, M., Fatima, A., Iqbal, S., Tufail, M., & Karim, H. (2021). Analysis and optimization of springback during the V-bending of hot-rolled high strength steels (JSH440). *Journal of Engineering Research*, 7-26. doi:10.36909/jer.11027

[17] Parra Rodríguez, Y. (2020). Estudio de la recuperación elástica en aceros avanzados de alta resistencia de doble fase. Universidad Nacional de Colombia.: Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia.

[18] ASTM International. (2024). ASTM E517-24: Standard test method for plastic strain ratio r for sheet metal. ASTM International. doi:10.1520/E0517-24

[19] Slota, J., & Jurčičin, M. (2012). Springback prediction in sheet metal forming processes. *Advanced Technologies and Materials*(37(1)), 97-103.

[20] Roache, P. J. (1994). Perspective: A method for uniform reporting of grid refinement studies. *Journal of Fluids Engineering*, 116(3), 405–413. doi: 10.1115/1.2910291

- [21] Schwer, L. E. (2008). Is your mesh refined enough? Estimating discretization error using GCI. En Proceedings of the 7th LS-DYNA Anwenderforum. DYNAmore GmbH.
- [22] Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments (4.^a ed.). John Wiley & Sons.
- [23] Ford Motor Company. (2021). Ford Engineering Material Specification WSS-M1A368-A85: Steel, cold rolled, martensitic, 1700 grade (Rev. 08-DEC-2021). FOMOCO.
- [24] ANSYS, Inc. (2024). ANSYS Mechanical user's guide, release 2024 R1. ANSYS, Inc.
- [25] Celik, I., Ghia, U., Roache, P., Freitas, C., Coleman, H., & Raad, P. (2008). Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. *Journal of Fluids Engineering*, 130(7), 078001. doi:10.1115/1.2960953
- [26] Demeri, M. (2013). Advanced high-strength steels: Science, technology, and applications. ASM International. doi:10.31399/asm.tb.ahsssta.9781627082792.
- [27] Kim, M., Bae, G., Park, N., & Song, J. (2022). Springback reduction of ultra-high-strength martensitic steel sheet by electrically single-pulsed current. *Materials*, 15(7), 2373. doi:10.3390/ma15072373
- [28] Ferziger, J., Perić, M., & Street, R. (2020). Computational methods for fluid dynamics. Springer. doi:10.1007/978-3-319-99693-6



Néstor Enrique Hernández Alcalá.

Ingeniero Bioquímico por la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Maestrante en Manufactura Avanzada en CIATEQ A.C., Querétaro. Actualmente se desempeña como Ingeniero de Desarrollo de Producto en Shape Corp., con especialización en

sistemas de parachoques para OEM automotrices. Certificado Master Black Belt Six Sigma. Sus líneas de investigación incluyen simulación por elementos finitos, conformado de lámina metálica en aceros AHSS y diseño de experimentos aplicado a procesos de manufactura avanzada.



INSTITUTO TECNOLÓGICO
SUPERIOR
DE SAN LUIS POTOSÍ, CAPITAL®