

Análisis Comparativo en los Procesos de Soldadura en la Industria Naval: Caso Experimental de Soldadura por Arco Eléctrico SMAW, GMAW, GTAW y FCAW

Comparative Analysis of Welding Processes in the Shipbuilding Industry: Experimental Case of Electric Arc Welding SMAW, GMAW, GTAW and FCAW

Jonathan Castro^a, Francisco Espinel^a, Pedro Castro^a

^aFacultad de Ingeniería Industrial, Universidad de Guayaquil, Guayaquil
090112, Ecuador.

¹**Autor de correspondencia:** jcastrog@ug.edu.ec

Recibido: 03, noviembre 2024; **Revisado:** 25, noviembre 2024; **Aceptado:** 25, diciembre 2025
Causalidad 2025, Vol. 1, Núm. 1

DOI: 10.70929/caui3.v1i1.1zazzp73

Cómo Citar: J. Castro, F. Espinel, and P. Castro-Verdezoto, “Análisis Comparativo en los Procesos de Soldadura en la Industria Naval: Caso Experimental de Soldadura por Arco Eléctrico SMAW, GMAW, GTAW y FCAW”, *Revista Digital Científica Causalidad (caui3)*, vol. 1, no. 1, pp. 12–39, Jan. 2025, doi: 10.70929/caui3.v1i1.1zazzp73.

Resumen

Este estudio evalúa cómo el amperaje y el grosor del material afectan la resistencia y calidad de las soldaduras en la industria naval. Se realizaron pruebas destructivas (tracción e impacto) y no destructivas (ultrasonido y líquidos penetrantes) con diferentes combinaciones de parámetros en los procesos de soldadura SMAW, GMAW, GTAW y FCAW. Los resultados muestran que el grosor del material y el tipo de soldadura son los factores más influyentes en la calidad de las uniones. El proceso FCAW demostró un rendimiento superior en resistencia de tracción, alcanzando hasta 450 MPa en materiales de 10 mm y 12 mm de espesor. Aunque el amperaje varió entre 185 A y 200 A, su impacto fue menor en comparación con el grosor del material y el tipo de soldadura. El estudio concluye que la selección del método de soldadura y los parámetros operativos deben ajustarse a las necesidades específicas de la aplicación naval, ofreciendo recomendaciones para optimizar estos procesos y mejorar la eficiencia y calidad en la industria naval.

Palabras clave - Tracción, grosor del material, pruebas destructivas, pruebas no destructivas, diseño experimental factorial.

Abstract

This study evaluates how amperage and material thickness affect the strength and quality of welds in the shipbuilding industry. Destructive (tensile and impact) and non-destructive (ultrasonic and liquid penetrant) tests were performed with different combinations of parameters in SMAW, GMAW, GTAW and FCAW welding processes. The results indicate that the material thickness and welding type are the most influential factors on joint quality. The FCAW process demonstrated superior performance in tensile strength, reaching up to 450 MPa in 10 mm and 12 mm thick materials. Although the amperage varied between 185 A and 200 A, its impact was minor compared to material thickness and weld type. The study concludes that the selection of welding method and operating parameters should be tailored to the specific needs of the marine application, offering recommendations to optimize these processes and improve efficiency and quality in the naval industry.

Keywords - Tensile, material thickness, destructive testing, non-destructive testing, factorial experimental design.

1. Introducción

La soldadura naval es un proceso crítico y fundamental en la construcción y reparación de embarcaciones. La selección de la técnica de soldadura adecuada afecta directamente la resistencia, durabilidad y la integridad de la estructura naval. Estos procesos implican la unión de partes metálicas usando técnicas especializadas. Según Eyres [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], el proceso de soldadura es esencial para garantizar la integridad estructural y seguridad de las estructuras navales.

La industria de la soldadura es crucial para una amplia gama de sectores, desde la construcción y la manufactura hasta la automotriz y la aeroespacial. Los métodos de soldadura mencionados son ampliamente utilizados debido a sus ventajas específicas en términos de versatilidad, eficiencia y costo. Sin embargo, la calidad y la resistencia de las soldaduras pueden variar significativamente en función de diversos factores, como el amperaje aplicado y el grosor del material utilizado. En el contexto actual, donde la seguridad y la durabilidad de las estructuras soldadas son de máxima prioridad, es fundamental comprender cómo estos factores influyen en la integridad de las uniones soldadas. La variabilidad en la calidad de las soldaduras no solo afecta la vida útil de los componentes, sino que también puede tener consecuencias catastróficas en términos de fallos estructurales.

La soldadura por arco eléctrico se utiliza principalmente en las construcciones navales, donde se genera un arco eléctrico entre un electrodo metálico y la pieza de trabajo; funde los materiales creando así una conexión sólida. Los electrodos se encuentran revestidos y se adaptan a diferentes tipos de metal proporcionando material adicional para la unión en el proceso. Según Carlton [8], la soldadura submarina compone una variable fundamental en la soldadura naval, empleada para unir partes metálicas bajo el agua. Este método es esencial para la construcción y mantenimiento de las estructuras submarinas, así como de las plataformas offshore. Otro factor crítico en este proceso es el control de calidad ya que se necesita asegurar que las soldaduras de las estructuras sean realmente fuertes y seguras [9].

La soldadura naval cubre una importancia crucial en los procesos navales por varias razones fundamentales:

Integridad estructural: La solidez de las uniones soldadas determina en gran medida la integridad estructural de las embarcaciones. Una soldadura defectuosa podría comprometer la resistencia del casco y, por lo tanto, la seguridad de la embarcación y su tripulación.

Durabilidad y resistencia: Las condiciones marinas pueden ser extremadamente desafiantes para las embarcaciones, con exposición a la corrosión, las fuerzas del oleaje y la presión del agua. Las soldaduras de alta calidad son esenciales para garantizar que la embarcación mantenga su resistencia y durabilidad en tales condiciones.

Reducción de peso: En la construcción naval, se busca constantemente optimizar el diseño de las embarcaciones para mejorar la eficiencia y el rendimiento. La soldadura naval permite la creación de estructuras más ligeras y aerodinámicas en comparación con otras técnicas de unión, lo que puede contribuir a una mejor eficiencia energética y desempeño.

Flexibilidad de diseño: La soldadura naval ofrece una mayor flexibilidad en el diseño de las embarcaciones, permitiendo la unión de piezas metálicas de formas y tamaños variados. Esto facilita la creación de estructuras complejas y adaptadas a las necesidades específicas de cada tipo de nave según Carlton.

Eficiencia en la construcción y reparación: La soldadura naval es un proceso relativamente rápido y eficiente en comparación con otras formas de unión, lo que contribuye a acelerar los procesos de construcción y reparación de embarcaciones. Esto es crucial en la industria naval, donde el tiempo de inactividad de una embarcación puede ser costoso.

1.1 Procesos de soldadura naval

A nivel mundial, la industria naval ha logrado avances significativos en los diferentes procesos de soldadura buscando constantemente la mejora de la eficiencia y la calidad de las construcciones marítimas [10], [11], [12], [13], [14].

Un estudio del Departamento de Energía de EE. UU (DOE) en el 2019, *Advances in Offshore Welding: Impact on the American Industry*, enfatiza la importancia crítica de los programas de investigación introducidos por la Administración Marítima de EE. UU (MARAD). Este estudio señala lo fundamental del programa en la mejora continua de los procesos de soldadura utilizados en la industria naval estadounidense e incluye los siguientes métodos.

SMAW (soldadura de Arco con electrodo revestido): En este proceso el equipo de soldadura utiliza electrodos recubiertos que se funden para formar un electrodo durante el proceso de soldadura. Es un método general y ampliamente utilizado gracias a la capacidad para soldar en distintas posiciones e inclusive en áreas de difícil acceso de las embarcaciones, como los cascos de barcos.

GTAW (Soldadura por Arco con Gas Tungsteno): La soldadura GTAW implica el uso de un electrodo de tungsteno no consumible y un gas inerte, como argón o helio, para proteger el arco y el baño de fusión. Este proceso ofrece alta precisión y control, lo que lo hace ideal para soldar metales delgados y componentes críticos en la construcción naval, como tuberías de alta presión y estructuras delicadas.

GMAW (Soldadura por Arco con Gas Metal): En la GMAW, se utiliza un alambre continuo como electrodo y un gas de protección, como dióxido de carbono o una mezcla de

argón y dióxido de carbono, para proteger el arco y el baño de fusión. Es un proceso rápido y eficiente, adecuado para soldar una amplia variedad de metales en la industria naval, desde acero hasta aluminio.

FCAW (Soldadura por Arco con Alambre Tubular): En este proceso, se emplea un alambre tubular que contiene un núcleo de flujo para proteger el arco y el baño de fusión, lo que elimina la necesidad de un gas de protección adicional. Es una opción popular para soldar en exteriores y en condiciones adversas, como en la construcción de barcos, debido a su capacidad para proporcionar soldaduras de alta calidad en diversas situaciones.

Cada proceso de soldadura tiene sus propias características y ventajas, y la elección del método adecuado depende de factores como el tipo de metal, la aplicación específica y las condiciones de trabajo.

La selección del método de soldadura apropiado es transcendental en la industria naval para garantizar la calidad y durabilidad de las estructuras. Sin embargo, la falta de información comparativa sobre los procesos de soldadura por arco eléctrico SMAW (soldadura por arco metálico con gas), GTAW (soldadura por arco metálico protegido), GMAW (soldadura por arco de tungsteno con gas) y FCAW (Soldadura por Arco con Núcleo Fundente) dificulta la decisión en el proceso de construcción, o en su caso, seleccionar las condiciones más apropiadas para sus usos. Se necesita un análisis comparativo para entender las diferencias entre estos métodos y su impacto en la unión de materiales y rendimiento de las uniones soldadas en aplicaciones navales.

El análisis comparativo entre los diferentes procesos de soldadura en la industria naval se fundamenta en su influencia directa en la seguridad y eficacia de las estructuras marinas. Según García, la correcta elección del proceso de soldadura puede tener un impacto notable en la integridad estructural de buques y plataformas offshore, además de mejorar su resistencia frente a condiciones ambientales adversas. Al comparar métodos como el SMAW y el FCAW, se pueden determinar las mejores técnicas y tecnologías que permiten optimizar la producción, reducir costos y garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad y seguridad en la construcción naval, asegurando así la competitividad y durabilidad de las infraestructuras marítimas a largo plazo.

Este análisis proporcionará a la industria naval la base para optimizar la seguridad, durabilidad y eficiencia de las estructuras marítimas construidas.

En el proceso de soldadura ocurren diferentes fenómenos físicos como consecuencia del campo de temperatura, campo de esfuerzos y deformaciones y campo de estado microestructura. En ocasiones los cordones de soldadura son mecanizados por condiciones de diseño induciendo mayores esfuerzos residuales al material.

En consecuencia, se exponen las condiciones de mayor importancia:

Campo de temperatura: Durante el proceso de soldadura, se generan temperaturas extremadamente altas en la zona de fusión y alrededor de ella. Estas temperaturas pueden variar significativamente dentro y alrededor de la zona de soldadura, creando gradientes térmicos. Estos gradientes pueden causar expansiones y contracciones diferenciales en el material, lo que resulta en tensiones residuales y deformaciones plásticas. Además, las altas temperaturas pueden afectar la microestructura del material, influyendo en sus propiedades mecánicas.

Campo de esfuerzos y deformaciones: Los gradientes térmicos generados durante la soldadura causan esfuerzos térmicos y de contracción en la zona soldada y en las áreas

adyacentes. Estos esfuerzos pueden superar los límites elásticos del material, provocando deformaciones permanentes. Las restricciones geométricas y las condiciones de carga también pueden contribuir a estos esfuerzos, especialmente en áreas con cambios bruscos de geometría o en uniones de diferentes materiales.

Campo de estado microestructural: La soldadura puede alterar la microestructura del material en la zona de fusión y la zona afectada por el calor. Durante el enfriamiento, se forman nuevas fases y estructuras cristalinas, lo que afecta las propiedades mecánicas del material. Estos cambios micro estructurales pueden influir en la resistencia, la ductilidad y la tenacidad del material soldado, así como en su susceptibilidad a la corrosión y la fatiga.

Los esfuerzos residuales que se generan durante la soldadura tienen un impacto considerable en la integridad de las estructuras metálicas. Pueden debilitar la resistencia a la fatiga y la solidez mecánica, aumentando el riesgo de grietas y reduciendo la capacidad de soporte de carga. Asimismo, pueden provocar deformaciones no deseadas que perjudican la precisión dimensional y el rendimiento del sistema.

1.2 Industria naval en Ecuador

A nivel nacional, la industria naval del Ecuador también ha experimentado modernización en sus procesos de soldadura. La adaptación de los procesos de soldadura naval presenta diversos desafíos que deben abordarse:

Limitaciones de diseño y acceso: Algunas áreas de la embarcación pueden ser difíciles de alcanzar para llevar a cabo los procesos de soldadura de manera eficiente. Es necesario adaptar los métodos de soldadura para trabajar en áreas de acceso restringido y garantizar la integridad estructural en toda la embarcación.

Variedad de materiales: Las embarcaciones están construidas con una amplia gama de materiales, cada uno con propiedades de soldabilidad distintas. La adaptación de los procesos de soldadura para trabajar con diferentes tipos de materiales requiere una comprensión profunda de las características de soldabilidad y la selección adecuada de parámetros de soldadura.

Cumplimiento de normativas: La industria naval está sujeta a estrictas regulaciones de seguridad y calidad. Es necesario adaptar los procesos de soldadura para cumplir con estas normativas mediante la implementación de procedimientos de control y aseguramiento de calidad adecuados.

Innovación tecnológica: Los avances constantes en tecnología de soldadura requieren una adaptación continua de los procesos de soldadura naval. Es crucial mantenerse al tanto de las últimas innovaciones y capacitar al personal para aprovechar al máximo estas tecnologías emergentes.

2. Metodología y planteamiento del problema

Para establecer la comparación entre los métodos de soldadura naval y elegir el proceso más apropiado entre: SMAW, GMAW, GTAW y FCAW [15], [16], [17], se realizó un análisis comparativo experimental. Se realizó un diseño experimental factorial con el fin de analizar la resistencia de las uniones soldadas empleando varios procesos. Este diseño consideró variables como el tipo de soldadura, el grosor del material y diferentes técnicas de inspección

no destructiva, como la inspección visual, partículas magnéticas, tintas penetrantes y ultrasonido. El objetivo de este experimento fue proporcionar una comprensión precisa y objetiva de cómo los diversos parámetros de soldadura afectan la calidad y longevidad de las uniones soldadas en aplicaciones navales.

El diseño experimental es una metodología utilizada para organizar, llevar a cabo, analizar y entender experimentos de manera efectiva y eficiente. Esta herramienta permite a los investigadores detectar y evaluar los impactos de diferentes factores y sus interacciones en un proceso o sistema.

En el diseño experimental no se incluyeron los procesos de soldadura SMAW y GTAW debido a los siguientes factores:

GTAW: Es conocido por ser más lento en comparación con métodos como el GMAW (MIG/MAG), ya que requiere la alimentación manual del metal de aporte mientras se gestiona el arco y el gas de protección. Aunque produce soldaduras de alta calidad con acabados precisos y limpios, su velocidad reducida lo hace menos eficiente para aplicaciones que exigen una producción rápida y económica, como en la fabricación industrial a gran escala.

SMAW: Este proceso es más lento debido a la necesidad de cambiar regularmente los electrodos consumibles y eliminar la escoria generada durante la soldadura. La escoria debe limpiarse después de cada pasada, lo que aumenta el tiempo y el esfuerzo necesarios para completar una junta.

Para un diseño factorial 2³, seleccionamos tres factores, cada uno con dos niveles (bajo y alto). En este caso, los factores y sus niveles son:

1. Tipo de soldadura:

- GMAW
- FCAW

2. Espesor de la plancha:

- 10 mm
- 12 mm

3. Amperaje

- 180 A
- 200 A

Las respuestas que se medirán son:

- Resistencia (Mpa)
- Tintes penetrantes (número de fallas)
- Ultrasonido (número de fallas)

2.1 Diseño Factorial

El diseño factorial completo tendría un total de $2^3=8$ combinaciones experimentales (ver el Cuadro 1), que coinciden con las 8 corridas en el documento.

Cuadro 1. Diseño Experimental.

Corridas	Amperaje	Grosor	Tipo de Soldadura
1	180	10	GMAW
2	180	10	FCAW
3	180	10	GMAW
4	180	10	FCAW
5	200	12	GMAW
6	200	12	FCAW
7	200	12	GMAW
8	200	12	FCAW

Un diseño factorial 2^3 como el que se muestra, indica que cada factor cuenta con dos niveles y que hay tres factores en total. Este tipo de diseño puede ser descrito matemáticamente a través de modelos lineales y se evalúa mediante la metodología del análisis de varianza (ANOVA).

Los resultados del experimento fueron evaluados mediante herramientas estadísticas, como el análisis de varianza, junto con gráficos de efectos principales e interacciones, con el fin de identificar el impacto de las variables de control en las características de calidad de las soldaduras.

En el diseño experimental planteado, se evaluarán tres factores (amperaje, tipo de soldadura y grosor del material), cada uno en tres niveles diferentes. Esto da lugar a $2^3 = 8$ combinaciones experimentales. Las variables por medir incluyen la resistencia, las tintas penetrantes y las pruebas de ultrasonido.

La formulación matemática del modelo factorial completo para este experimento sería: Modelo Matemático del Diseño Factorial 2^3 .

Para un diseño factorial 2^3 con tres factores (A, B, C), el modelo lineal general es:

$$Y = \mu + A_i + B_j + C_k + (AB)_{ij} + (AC)_{ik} + (BC)_{jk} + (ABC)_{ijk} + \epsilon_{ijkl} \quad (1)$$

donde:

- Y es la variable de respuesta (por ejemplo, resistencia, número de defectos).
- μ es la media general.
- A_i es el efecto del i-ésimo nivel del factor A (Tipo de Soldadura).
- B_j es el efecto del j-ésimo nivel del factor B (Espesor de Probeta).
- C_k es el efecto del k-ésimo nivel del factor C (Proceso de Inspección).
- $(AB)_{ij}$ es el efecto de la interacción entre el factor A y el factor B.
- $(AC)_{ik}$ es el efecto de la interacción entre el factor A y el factor C.
- $(BC)_{jk}$ es el efecto de la interacción entre el factor B y el factor C.
- $(ABC)_{ijk}$ es el efecto de la interacción entre los tres factores.
- ϵ_{ijkl} es el término de error experimental.

2.2 Diseño Experimental

El diseño experimental emplea un enfoque comparativo en el que se producirán diversas probetas estándar de acero naval y se soldarán usando los procesos GMAW y FCAW. Cada tipo de unión soldada se realizará bajo condiciones controladas para garantizar la reproducibilidad de los resultados. Se ha establecido un diseño factorial completo para analizar el efecto combinado de las variables independientes, que abarcan el tipo de proceso de soldadura y los parámetros controlados (como amperaje, voltaje y velocidad de alimentación del material de aporte).

Para realizar la comparación entre los procesos de soldadura GMAW y FCAW, se llevará a cabo el siguiente procedimiento experimental:

Preparación de las muestras

Se producirán probetas de tamaño estándar utilizando materiales y técnicas de soldadura específicas para cada método. Las probetas se fabricarán siguiendo las normativas y estándares vigentes en la industria naval.

Soldadura de las probetas

Las soldaduras se efectuarán en las probetas preparadas utilizando los procesos GMAW y FCAW. Cada proceso será llevado a cabo por soldadores certificados, siguiendo las recomendaciones de los fabricantes y las mejores prácticas del sector.

Ensayos no destructivos y destructivos

Después de completar las soldaduras, se realizarán ensayos no destructivos, como inspección visual, líquidos penetrantes y ultrasonido, junto con pruebas destructivas de tracción para evaluar la calidad de las uniones soldadas.

2.3 Materiales utilizados

Se utilizó el acero A36 al ser un acero estructural de bajo carbono que se usa extensamente en ingeniería y construcción por sus propiedades equilibradas. Su módulo de elasticidad, también conocido como módulo de Young, es de aproximadamente 200 GPa, lo que refleja su rigidez y su habilidad para resistir deformaciones cuando se somete a cargas. La resistencia máxima a la tracción del acero A36 varía entre 400 y 550 MPa, lo que evidencia su capacidad para soportar fuerzas de tensión antes de fracturarse.

También, se usó el Alambre Sólido de 1.2 mm para GMAW (Gas Metal Arc Welding), el cual es un alambre sólido de 1.2 mm es un consumible frecuentemente empleado en la soldadura GMAW. Este alambre es continuo y carece de núcleo.

Además, del Alambre Tubular de 1.2 mm para FCAW (Flux-Cored Arc Welding), el cual cuenta con un núcleo de fundente alojado en un tubo metálico. El fundente puede generar gas protector al calentarse durante el proceso de soldadura, lo cual puede eliminar la necesidad de un gas externo. Sin embargo, ciertos tipos de alambre tubular todavía requieren gas de protección adicional.

2.4 Desarrollo del Experimento

Se eligió el acero A36 para las probetas debido a que sus propiedades mecánicas son adecuadas para aplicaciones navales. Este tipo de acero presenta una buena capacidad de soldadura y características mecánicas favorables. Para la fabricación de las probetas, las

placas de acero A36 se cortaron a dimensiones específicas de acuerdo con los niveles de grosor establecidos en el experimento. Se emplearon sierras de cinta o cizallas para garantizar cortes precisos. Los grosores definidos fueron: 10 mm para el grosor bajo y 12 mm para el grosor alto, como se ve en la Figura 1.



Figura 1. Placas de acero A36 cortadas para probetas.

La Figura 2, describe la preparación de los bordes de las placas, estos fueron biselados con una máquina de biselado o una esmeriladora para formar un ángulo de 30 grados. Este biselado ayuda a lograr una adecuada fusión y penetración del material durante la soldadura (ver Figura 3).



Figura 2. Biselado de placa.



Figura 3. Preparación de placas biseladas.

Las superficies de las probetas se limpiaron minuciosamente con solventes apropiados para eliminar aceites, óxidos y cualquier otra forma de contaminación. Se emplearon desengrasantes y cepillos de alambre para garantizar que las superficies estuvieran limpias y libres de impurezas.

Con respecto, a la configuración de los equipos de soldadura, para el proceso de GMAW, se operaron las máquinas para operar en dos niveles de amperaje. Para las máquinas FCAW, estas se configuraron con los parámetros necesarios para el electrodo tubular.

- Electrodo: E71T-1. ($\phi 1.2$ mm)
- Los parámetros de soldadura ajustados para cada combinación experimental fueron:
 - Velocidad de Soldadura:
 - GMAW-P: 2.3-2.8 mm/s.
 - FCAW: 3.-3.6 mm/s.
 - Amperaje Bajo: 180 ± 5 A. 23 ± 5 V.
 - Amperaje Alto: 200 ± 5 A. 27 ± 5 V.
- Para llevar a cabo las soldaduras: se realiza una preparación previa.
 - Secado del Electrodo (si aplica): Para el FCAW, se comprobó que el electrodo estuviera seco y en condiciones óptimas para prevenir defectos en la soldadura.
 - Configuración del Entorno: Se modificaron las condiciones ambientales de acuerdo con el tipo de soldadura. En el caso del FCAW, se llevó a cabo la soldadura en exteriores para evaluar su resistencia a la contaminación por viento.

Luego, se realizó la soldadura GMAW con una técnica continua para asegurar una fusión uniforme, siguiendo la trayectoria establecida y manteniendo la velocidad de avance constante.

Para la FCAW, se aplicó la soldadura en posición plana (ver Figura 4), para aprovechar la versatilidad del proceso para evaluar la calidad en posición plana.



Figura 4. Inicio del proceso de soldadura.

Finalmente, la Figura 5 muestra la inspección visual de las soldaduras, que busca defectos obvios como porosidades, grietas, y soldaduras incompletas. Se realizaron las mediciones de calidad donde se midieron las dimensiones de las soldaduras verificando que se cumplieran con las especificaciones y estándares requeridos.



Figura 5. Medición de soldadura con galga.

Luego, se realizaron las pruebas no destructivas una vez limpiadas las soldaduras con solventes para eliminar polvo y aceite. La Figura 6 describe la forma, como se aplicó un tinte penetrante en la superficie de la soldadura dejando actuar entre 5 y 15 minutos. Una vez pasado el tiempo, se aplicó un revelador blanco sobre la superficie para visualizar los defectos.



Figura 6. Aplicación del revelador a la placa.

Se realizaron pruebas de ultrasonido, que se muestran en la Figura 7, mientras la Figura 8 describe un escaneo ultrasónico realizado mediante un transductor para detectar defectos internos como inclusiones o fisuras. Una vez realizado, se registraron los resultados para su análisis.



Figura 7. Prueba de ultrasonido.

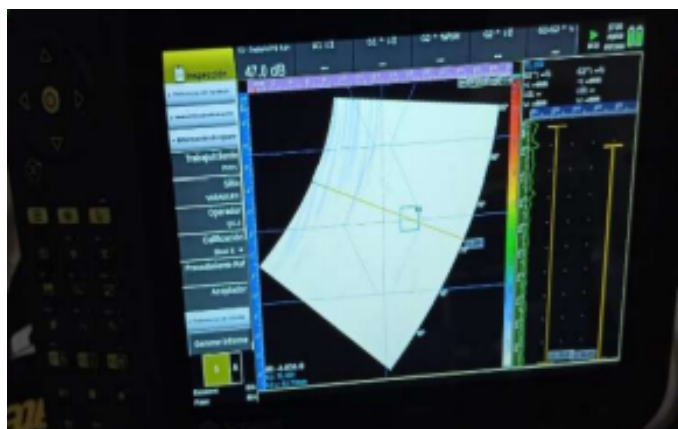


Figura 8. Revisión de fallas en equipo de ultrasonido.

Para las pruebas destructivas, se cortaron probetas de tamaño estándar para pruebas de tracción siguiendo las especificaciones del estándar de prueba. Luego, estas probetas se montaron en la máquina de tracción, asegurando un alineamiento adecuado para evitar errores de medición. La Figura 9 muestra la aplicación de una carga progresiva hasta que la probeta falló, registrando la carga máxima y el alargamiento hasta la fractura.



Figura 9. Prueba de tracción a probetas.

La resistencia máxima a la tracción, el módulo de elasticidad y el alargamiento total de la probeta fueron medidos.

3. Resultados y Discusión

La experimentación se realizó empleando un diseño factorial completo 2^3 , lo que resultó en 8 combinaciones experimentales. Los factores evaluados incluyeron el amperaje (bajo de 180A y alto de 200A), el tipo de soldadura (GMAW y FCAW) y el grosor del material (bajo de 10 mm y alto de 12 mm). Los ensayos comprendieron pruebas destructivas (como tracción e impacto) y no destructivas (como ultrasonido y líquidos penetrantes) para valorar la calidad de las uniones soldadas. Los resultados se analizaron utilizando modelos lineales en Minitab para establecer la relación entre los factores y la calidad de la soldadura.

3.1 Resultados del Diseño Experimental

Los resultados de las pruebas de tintas penetrantes y ultrasonido se registran según el número de fallas, mientras que los resultados de la prueba de tracción se expresan en mega pascuales. En el análisis realizado con MINITAB, el tipo de soldadura GMAW se considerará como bajo y el FCAW como alto.

Cuadro 2. Resultados del Diseño Experimental Completo.

Corridas	Amperaje	Grosor	Tipo de soldadura	Tintas penetrantes	Ultrasonido	Tracción (MPa)
1	180±5	10	GMAW (B)	2	2	345
2	180±5	10	FCAW (A)	1	1	354
3	180±5	12	GMAW (B)	2	1	463
4	180±5	12	FCAW (A)	1	1	494
5	200±5	10	GMAW (B)	2	1	348
6	200±5	10	FCAW (A)	1	1	362
7	200±5	12	GMAW (B)	1	1	469
8	200±5	12	FCAW (A)	1	1	498

El Cuadro 2 muestra los resultados de diversas corridas de soldadura, abarcando variables como el amperaje, el grosor del material, el tipo de soldadura y los métodos de inspección. En ella se detallan ocho corridas, cada una con un amperaje específico (180±5 o 200±5), un grosor del material (10 o 12 mm), y dos tipos de soldadura: GMAW (Gas Metal Arc Welding) y FCAW (Flux-Cored Arc Welding).

En cuanto a la tracción, los resultados oscilan entre 345 MPa y 498 MPa, lo que refleja la resistencia de las uniones soldadas bajo distintas condiciones. Estos datos evidencian cómo el tipo de soldadura y el grosor del material afectan las propiedades mecánicas de las uniones. Por ejemplo, el uso de FCAW (A) generalmente muestra una mayor resistencia en comparación con GMAW (B) cuando se mantienen los mismos parámetros de amperaje y grosor. Esta información es esencial para evaluar la calidad y la idoneidad de los procesos de soldadura en aplicaciones industriales.

3.2 Análisis de modelo lineal: Relaciones SN vs. amperaje; espesor; tipo de soldadura en MINITAB

Los coeficientes de un modelo muestran cómo cada variable independiente influye en la variable dependiente. Cada coeficiente descrito en el Cuadro 3, indica el cambio esperado en la variable dependiente, por cada cambio unitario en la variable independiente, manteniendo las demás constantes variables. En resumen, estos coeficientes revelan la dirección y la fuerza de la influencia de cada predictor en el modelo de salida.

Cuadro 3. Coeficientes de Modelos Estimados.

Término	Coef.	coef.	T	P
Constante	3.0238	0.5590	5.409	0.006
AMPERAJE BAJO	0.7526	0.5590	1.346	0.249
ESPESOR BAJO	0.7526	0.5590	1.346	0.249
TIPO DE SOLD. BAJO (GMAW)	1.2629	0.5590	2.259	0.087

El R^2 del 68.57% indica que el modelo explica el 68.57% de la variabilidad de los datos. El R^2 ajustado del 45.00% tiene en cuenta la complejidad del modelo ajustando el porcentaje en el número de variables utilizadas. En resumen, R^2 indica la adaptación general, mientras que, el ajustado refleja el ajuste real dado el número de variables.

Cuadro 4. Coeficientes del Modelo de Regresión.

Términos	Constante (Intercepto)	Amperaje bajo	Espesor bajo	Tipo soldadura
Coeficiente (Coef)	3.0238	0.7526	0.7526	1.2629
Error estándar (coef)	0.590	0.5590	0.5590	0.5590
T	5.409	1.346	1.356	2.259
P	0.006	0.249	0.249	0.087

El Cuadro 4 muestra los coeficientes del modelo de regresión y sus errores estándar, Valor T y valor P. La constante tiene un coeficiente de 3.0238 y un error estándar de 0.5590, con un valor T de 5.409 y un valor P de 0.006. Esto muestra que la constante es estadísticamente significativa, lo que sugiere que su influencia sobre la variable dependiente es fuerte y no por casualidad. En cuanto a las variables independientes, el bajo Amperaje y el bajo Espesor tienen coeficientes 0.7526, con valor T=1.346 y valor P=0.249, lo que significa que no son estadísticamente significativos y no tienen un impacto relevante en la variable dependiente. El tipo de soldadura, con un coeficiente de 1.2629, presenta un valor T=2.259 y un valor de P de 0.087, lo que indica una tendencia significativa, aunque no alcanzó el umbral común de 0.05 para ser considerado significativo. En resumen, sólo la constante indica una influencia significativa, mientras que las variables independientes tienen un efecto no significativo y el tipo de soldadura sugiere una posible influencia que no es final.

3.3 Análisis de Varianza de Relaciones SN

El análisis de varianza de las relaciones SN examina cómo se diferencian entre grupos o las variables independientes afectan a la variable dependiente. Determinar si hay variaciones observadas en la variable dependiente son significativas en relación con los cambios en variables independientes. En definitiva, estima la influencia de las variables independientes sobre la variable dependiente y si esta influencia es significativa.

Tabla 5. Coeficientes del Modelo de Regresión.

Fuente	GL	SC Sec,	SC Ajust,	MC Ajust.	F	P
Amperaje	1	4.531	4.531	4.531	1.81	0.249
Espesor	1	4.531	4.531	4.531	1.81	0.249
Tipo de Soldadura	1	12.759	12.759	12.759	5.10	0.087
Error residual	4	10.001	10.001	2.500		
Total	7	31.821				

El Cuadro 5 muestra los resultados de un análisis de varianza destinado a evaluar el impacto de tres factores: intensidad, espesor y tipo de soldadura. Factores de amperaje y espesor. tienen valores de P de 0.249, lo que indica que no tienen un efecto significativo en la variable dependiente. El tipo de soldadura tiene un valor P de 0.087, lo que sugiere una tendencia hacia significativo, aunque no es estadísticamente significativo al nivel convencional de 0.05. El valor F para el tipo de soldadura es 5.10, lo que indica un impacto potencial. Ud. La variabilidad no explicada por estos factores se refleja en el error residual.

Cuadro 6. Coeficientes del Modelo de Regresión.

	Constante	Amperaje Bajo	Espesor Bajo	Tipo de Soldadura Bajo
Coeficiente (Coef)	3.0238	0.7526	0.7526	1.2629
Error Estándar (Coef)	0.5590	0.5590	0.5590	0.5590
T-valor (T)	5.409	0.7526	1.346	2.259
P-valor (P)	0.006	0.249	0.249	0.087

El Cuadro 6 presenta los resultados del análisis de un modelo de regresión de cuatro vías. términos: constante y tres variables independientes (bajo amperaje, espesor y tipo). Baja soldadura). La constante tiene un coeficiente de 3.0238 y un error estándar de 0.5590, con un valor T de 5.409 y un valor P de 0.006, lo que indica que es significativamente diferente de cero y que su efecto sobre la variable dependiente es estadísticamente significativo.

Por otro lado, los coeficientes para bajo amperaje y bajo espesor son 0.7526 cada uno, con errores estándar iguales a 0,5590. Ambos tienen valores T de 0.7526 y 1.346, y valores P de 0.249, lo que sugiere que estos factores no tienen un impacto significativo en la variable dependiente El coeficiente para el tipo de soldadura débil es 1.2629 con un error estándar de 0.5590, un valor T de 2.259 y un valor P de 0.087, lo que indica una posible tendencia hacia significativo, aunque no concluyente a un nivel de significancia conjunta de 0.05. En resumen, sólo la constante tiene un significado claro, mientras que las variables independientes no tienen influencia significativa y se presenta el tipo de soldadura baja un

impacto marginal.

El R cuadrado de 68.57% indica que el modelo explica aproximadamente el 68.57% de la Variabilidad de la respuesta SN. Sin embargo, el R cuadrado ajustado del 45.0% sugiere que, después de ajustar por el número de predictores, el modelo puede no ser tan robusto como parece inicialmente.

Cuadro 7. Estadísticas de Análisis de Varianza para Términos del Modelo.

Términos	Constante (Intercepto)	Amperaje Bajo	Espesor bajo	Tipo de soldadura
GL (Grados de libertad)	1	1	1	1.2629
Suma de cuadrados Sec.	4.31	4.531	12.759	0.5590
Suma de cuadrados Ajust.	4.531	4.531	12.759	2.259
Medida de cuadrados ajustada	4.531	4.531	12.759	0.087
F-valor	1.81	1.81	5.10	
P-valor	0.249	0.249	0,087	

El Cuadro 7 presenta los resultados del análisis de varianza para diferentes términos en un modelo de regresión. La constante (intersección) tiene un valor de la suma de los cuadrados. secuencial de 4.531 y un cuadrado medio ajustado de 4.531, con un valor F de 1.81 y un valor de P de 0.249, que indica que la constante no tiene un efecto significativo sobre la variable dependiente. Del mismo modo, el amplificador de bajo y el bajo bruto tienen la misma cantidad de cuadrados medios secuenciales de 4.531 y cuadrados medios ajustados de 4.531, con valores F de 1.81 y valores de P de 0.249, lo que sugiere que ninguno de estos factores tiene impacto significativo en la variable dependiente. Por otro lado, el tipo de soldadura tiene una suma secuencial de cuadrados de 12.59 y un cuadrado medio ajustado de 2.259, con un valor F de 5.10 y un valor P de 0.087. Aunque el valor de P no alcanza el límite común de 0.05, lo que indica que el efecto no es estadísticamente significativo, el valor F sugiere que el tipo de soldadura puede tener un impacto significativo en la variable dependiente. En resumen, un amperaje bajo y constante y un espesor bajo no tienen ningún efecto significativo en la variable dependiente, mientras que el Tipo de Soldadura representa una Tendencia a comprender, aunque no suele alcanzar el nivel de comprensión. Aceptado.

3.4 Análisis de modelo lineal: Medias vs. amperaje; espesor; tipo de soldadura en MINITAB

Al analizar el modelo lineal en MINITAB, se estimó que el amperaje, espesor y el tipo de soldadura influye en la variable dependiente. Los resultados mostraron que el amperaje y el espesor no tuvieron un efecto significativo sobre la variable dependiente. Sin embargo, el tipo de soldadura tiende a afectar la variable dependiente, pero no de manera definitiva.

Cuadro 8. Coeficientes del Modelo de Regresión y Significancia Estadística.

Término	Coef.	EE el coef.	T	P
Constante	139.708	0.8323	167.860	0.000
Amperaje Bajo	-0.792	0.8323	-0.951	0.395
Espesor Bajo	-21.375	0.8323	25.682	0.000
Tipo de Bajo	-3.292	0.8323	-3.955	0.17

El Cuadro 8 muestra que la constante del modelo es muy significativa, con una fuerte influencia en la variable dependiente El bajo amperaje no tiene ningún efecto significativo, dado su alto valor P. En Por otro lado, el Bajo espesor presenta un efecto significativo y negativo, con un coeficiente que indica una fuerte influencia sobre la variable dependiente. El tipo de bajo también es significativo y tiene un efecto negativo, aunque menos pronunciado que el de Bajo Espesor. En resumen, el grosor y el tipo de graves tienen un impacto significativo, mientras que el bajo amperaje no muestra un impacto significativo.

Cuadro 9. Coeficientes de Regresión y Significancia Estadística.

Término	Coef.	EE del coef.	T	P
Constante	239.817	1.326	180.882	0.000
Amperaje Bajo	-1.588	1.326	-1.198	0.97
Espesor Bajo	-37.239	1.326	-28.008	0.000
Tipo de Bajo	-6.134	1.326	-4.627	0.010

El Cuadro 9 muestra los coeficientes del modelo de regresión y el error, valores estándar, T y P para cada término. La constante es muy significativa con un coeficiente de 239.817 y un valor de P de 0.000, lo que indica una influencia fuerte y confiable en variable dependiente. El amplificador bajo tiene un coeficiente de -1.588 y un valor P de 0.297, lo que sugiere que no tiene ningún efecto significativo sobre la variable dependiente. Por otro lado, El refinamiento muestra un coeficiente de -37.39 con un valor de P de 0.000, lo que indica un impacto significativo y negativo. El tipo de bajo también es importante con un coeficiente de -6.134 y un valor P de 0.010, lo que indica un impacto negativo significativo, aunque es menos pronunciado que el grueso fino. En resumen, el grosor y tipo de bajo y Los graves son factores influyentes y significativos, mientras que los graves del amplificador no aparecen. significación estadística.

Cuadro 10. Análisis de Varianza para Amperaje, Espesor y Tipo de Soldadura.

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Amperaje	1	20.2	20.2	20.2	1.3	0.297
Espesor	1	11094.0	11094.0	11094.0	11094.0	0.000
Tipo de soldadura	1	301.0	301.0	301.0	301.0	0.010
Error residual	4	56.2	56.2	14.1	14.1	
Total	7	11471.4				

El Cuadro 10 presenta los resultados del análisis de varianza para evaluar el impacto de Intensidad, espesor y tipo de soldadura en la variable dependiente. El amplificador tiene uno. Valor F de 1.43 y valor P de 0.297, lo que indica que no hay ningún efecto significativo. Por el contrario, el espesor tiene un valor F de 788.91 y un valor P de 0.000, lo que demuestra un impacto muy significativo. El tipo de soldadura tiene un valor F de 21.41 y un valor de P de 0.010, lo que también indica un efecto significativo, aunque menos pronunciado. En resumen, el espesor es el factor con mayor efecto significativo, seguido del tipo La soldadura, mientras que el amperaje no tiene influencia relevante.

Cuadro 11. Impacto de Amperaje, Espesor y Tipo de Soldadura.

	Amperaje	Espesor	Tipo de soldadura
Grados de libertad	1	1	1
Suma de cuadrados sec.	20.2	11094.0	301.0
Suma de cuadrados Ajust.	20.2	11094.0	301.0
Media de cuadrados Ajust.	20.2	11094.0	301.0
Estadístico F	1.43	788.91	21.41
Valor P	0.297	0.000	0.000

El Cuadro 11 presenta los resultados del análisis de varianza para los factores de Amperaje, Espesor y tipo de soldadura. El amperaje tiene un valor F de 1,43 y un valor P de 0,297, lo que indica que no hay ningún efecto significativo sobre la variable dependiente. Por otro lado, El espesor muestra un valor F muy alto de 788,91 y un valor P de 0,000, lo que demuestra un impacto muy significativo en la variable dependiente. El tipo de soldadura también tiene un efecto significativo, con un valor F de 21,41 y un valor P de 0,000. En resumen, el espesor es el factor con el efecto más evidente, mientras que el tipo de soldadura también es importante, pero menos influyente que el espesor. El amperaje no muestra un efecto significativo sobre la variable dependiente, lo que sugiere que su inclusión en el modelo no contribuye significativamente a la explicación de variabilidad observada.

El error residual representa la variabilidad del resultado que no se explica por los factores analizados. En este caso, la variabilidad residual es relativamente baja (promedio de cuadrados de 14,1), lo que indica que la mayor parte de la variabilidad en los resultados se explica por los factores estudiados.

Cuadro 12. Comparación de Niveles para Amperaje, Espesor y Tipo de Soldadura.

Nivel	Amperaje	Espesor	Tipo de soldadura
1	3.776	3.776	4.287
2	2.271	2.271	1.761
Delta	1.505	1.505	2.526
Clasificar	2	3	1

El Cuadro 12 muestra la comparación de niveles de Amperaje, Espesor y Tipo de soldadura. Para cada factor, los valores se muestran en dos niveles diferentes, y también con la diferencia (Delta) entre estos niveles y su ranking por influencia. El amperaje tiene una diferencia Delta de 1.505, con el nivel 1 (3.776) indicando un superior al nivel 2 (2.271), clasificado en la posición 2. El espesor también indica un diferencial delta de 1.505, con ranking similar, el nivel 1 (3.776) es superior en el nivel 2 (2.271), clasificado en la posición 3.

El tipo de soldadura, sin embargo, tiene una diferencia Delta mayor que 2.526, el tipo de soldadura El nivel 1 (4.287) es significativamente más alto que el nivel 2 (1.761) y se ubica en posición 1, lo que indica mayor influencia relativa. En resumen, el tipo de soldadura tiene la mayor diferencia entre los niveles y el impacto más notable, seguido del amperaje y Grosor, que tienen las mismas diferencias, pero con diferentes clasificaciones al respecto efecto.

En este experimento de soldadura, los datos muestran que el tipo de soldadura tiene el mayor impacto en el resultado final, con una diferencia de 2.526 unidades entre ambos niveles nominales, lo que lo sitúa como el factor más importante. Amperaje y espesor tienen una diferencia idéntica de 1.505 unidades entre sus niveles, pero su influencia es menor en relación al tipo de soldadura. Incluso el amperaje y el espesor tienen un impacto obviamente su influencia es pequeña, clasificándose como segundo y tercer factor en importancia, respectivamente. Por lo tanto, para mejorar los resultados del experimento, El foco principal debe estar en el tipo de soldadura, seguido del amperaje y el espesor.

En el caso del amperaje, la Figura 10 muestra una línea casi horizontal, lo que sugiere que existe pequeña diferencia en las medias de respuesta entre niveles bajos y altos. La diferencia en el promedio de las respuestas es mínima, alrededor de 1.6 unidades, lo que demuestra que el amperaje tiene poco efecto sobre los resultados del experimento, este pequeño cambio subraya la consistencia de los resultados independientemente del nivel de amperaje. Por el contrario, el espesor representa una línea con una pendiente pronunciada, que refleja una gran diferencia entre los niveles bajos y altos. La respuesta media para un espesor alto es significativamente mayor que para un espesor bajo, con una diferencia de alrededor de 42.8 unidades. Esto muestra que el espesor tiene un impacto significativo en los resultados. El tipo de soldadura tiene una pendiente moderada, con una diferencia de 6.6 unidades entre niveles bajos y altos, lo que sugiere una influencia intermedia en comparar

con el espesor. En resumen, es el espesor el que más influye en el resultado, seguido del tipo de soldadura, siendo el amperaje el que tiene el menor efecto.

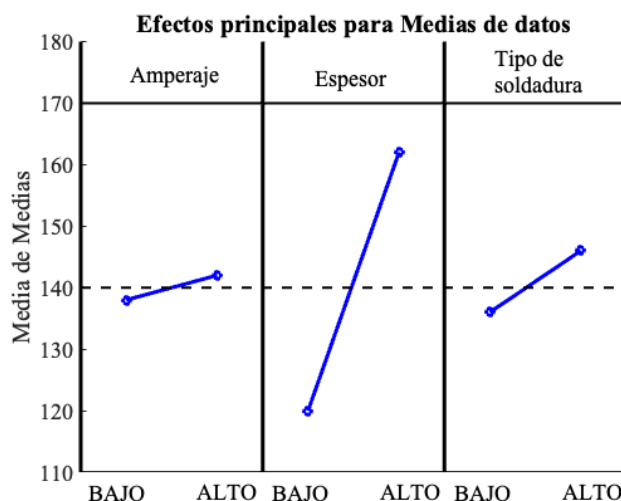


Figura 10. Efectos principales para Media de Datos.

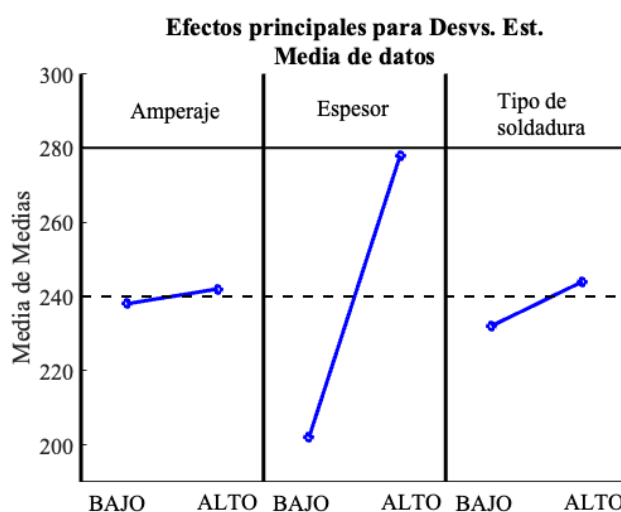


Figura 11. Efectos principales Desvs. Est.

La Figura 11 muestra que para el amperaje hay un ligero aumento en la desviación estándar cuando se cultiva de abajo hacia arriba. Este ligero aumento sugiere que un mayor amperaje puede estar asociado con una mayor variabilidad en el proceso de soldadura. lo que indica que las fluctuaciones de amperaje pueden afectar ligeramente la consistencia los resultados. En cambio, el espesor presenta una variabilidad más evidente. Línea entre niveles los espesores bajos y altos indican un aumento significativo en la desviación estándar de bajo espesor a alto espesor. Esto indica que el espesor del material soldado da como resultado mayor variabilidad en el proceso de soldadura, lo que sugiere que el espesor tiene un impacto significativo en la consistencia del proceso. Finalmente, el tipo de soldadura, La comparación de los procesos GMAW (bajo) y FCAW (alto) muestra que la desviación estándar es ligeramente mayor con FCAW. Esto sugiere que el proceso FCAW puede introducir una

mayor variabilidad en comparación con GMAW. En resumen, mientras todo Factores que afectan la variabilidad del proceso, el espesor tiene el mayor impacto. la desviación estándar.

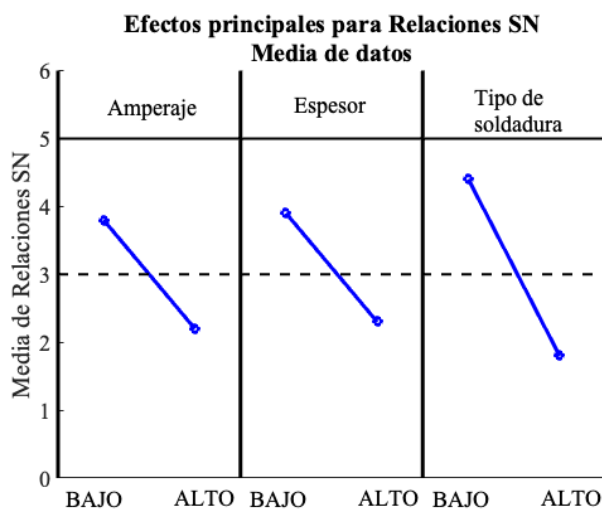


Figura 12. Efectos para Relaciones SN.

Más precisamente, para el factor “amperaje”, la relación SN promedio disminuye de aproximadamente 4.2 a 3.0 aumentando de menor a mayor. Para el espesor, el promedio oscila entre aproximadamente 3.5 y 3.0. En cuanto al “tipo de soldadura”, se observa una disminución más pronunciada, donde la ratio SN promedio cae de 4.5 a 2.8. ESTE Los resultados sugieren que se puede mejorar el mantenimiento de estos factores en niveles bajos, mejorando significativamente la calidad del proceso de soldadura en términos de relación señal-señal. ruido, que es una medida de calidad en la que se desea minimizar el ruido.

De la Figura 12 de los principales efectos de las relaciones SN en el proceso de soldadura, de ello se deduce que mantiene bajos los resultados de amperaje, espesor y tipo de soldadura. una mejor relación señal-ruido (SN). Una relación SN más alta indica una calidad del proceso con menos variabilidad. Cabe señalar que el tipo de soldadura tiene La mayor influencia sobre la relación SN, seguida por el amperaje y el espesor. Así que adáptate Estos factores en niveles bajos mejoran significativamente la estabilidad y la calidad de resultados de soldadura.

La Figura 13 de probabilidad normal muestra que el modelo se aplica a Se ajustan los datos de soldadura GMAW y FCAW y se distribuye la chatarra casi normal. Esto fortalece la validez del análisis y nos permite tener confianza en los resultados obtenidos. Además, la calidad y consistencia de los datos. La soldadura indica un proceso bien controlado, sin errores ni cambios importantes. imprevistos, esenciales para mantener la calidad del resultado de soldadura.

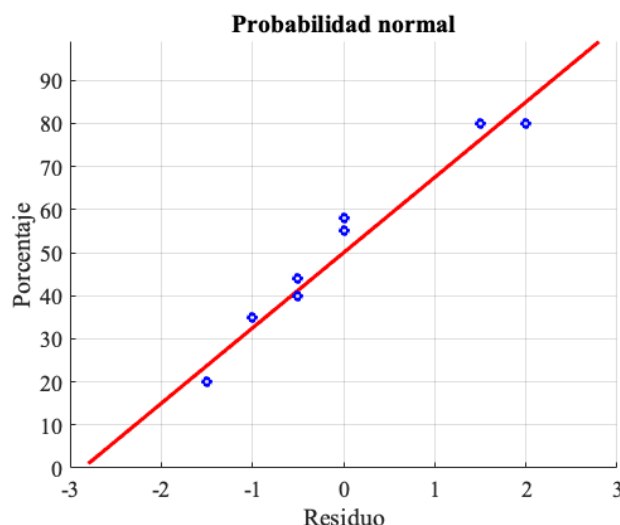


Figura 13. Probabilidad Normal.



Figura 14. Residuos vs Orden de observación.

Los residuos fluctúan sin seguir un patrón sistemático, lo que indica que los errores en las predicciones del modelo se distribuyen aleatoriamente, como se muestra en la Figura 14. Esta falta de modelos o Las tendencias sugieren que el modelo captura bien las relaciones en los datos sin dejar rastros. ninguna estructura sistemática desapercibida. También se muestra la varianza de los residuos. constante durante las observaciones, respetando la hipótesis de homocedasticidad, En otras palabras, la varianza del error permanece constante en todos los niveles. variables predictoras. Además, la gráfica de los residuos versus el orden de observación no muestra ningún signo automático. la correlación. Esto significa que los errores de las observaciones no están correlacionados. los demás, confirmando la independencia de las observaciones. Falta de autocorrelación fortalece la validez del supuesto de independencia en el análisis de regresión.

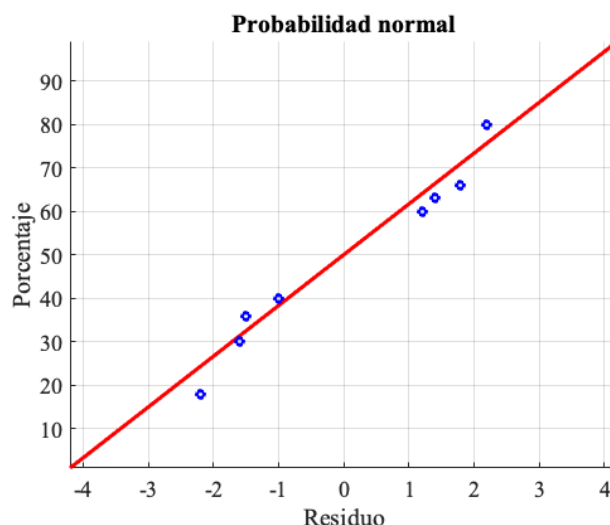


Figura 15. Porcentaje vs. Residuos.

La Figura 15 muestra que la mayoría de los puntos están cerca de la diagonal roja, indican que los residuos se distribuyen aproximadamente normalmente. Incluso si hay ligeras desviaciones, especialmente en los bordes del gráfico, son comunes y generalmente aceptable en el análisis de residuos. En cuanto a los valores, los residuos se distribuyen de la siguiente manera: los puntos con residuos entre -3 y -2 representan alrededor del 5% en el eje vertical, mientras que los residuos entre -2 y -1 están entre el 5% y 30%. Para residuos entre -1 y 1, los puntos encajan bien con la línea y referencia, cubriendo del 30% al 70%. Los residuos entre 1 y 2 se reparten entre el 70% y 95%, y los residuos entre 2 y 3 son aproximadamente 95%. El gráfico confirma que los residuos del modelo corresponden principalmente a una distribución normal, con alguna pequeña desviación en los extremos. Estas diferencias no son significativas, lo que sugiere que el modelo es adecuado y que los residuos no están presentes importantes problemas de normalidad. Por lo tanto, el ajuste del modelo a los datos es robusto y cumple con las expectativas normales de residuos.

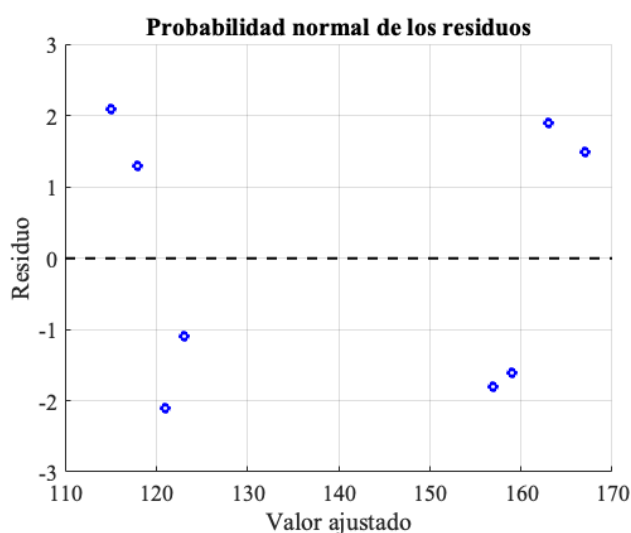


Figura 16. Residuos vs Valor Ajustado.

La Figura 16 muestra que los residuos se distribuyen alrededor de la línea horizontal en cero, lo que sugiere que no hay tendencias sistemáticas obvias en los residuos y que el modelo no captura tendencias no observadas. La varianza de los residuos es aproximadamente constante en todos los valores ajustados, lo que indica homocedasticidad. Esto es positivo porque sugiere que la varianza del error del modelo es estable y no varía dependiendo de los valores ajustados.

Observamos varios puntos que se desviaron significativamente de la línea horizontal interna. cero, especialmente con residuos cercanos a 2 y -2. Estos puntos pueden considerarse periferias y puede afectar el ajuste general del modelo. En cuanto a los valores Sumado, los que están alrededor de 100 tienen un residual entre -2 y 2, con algunos puntos lejos de cero. Para valores entre 140 y 160, los residuos también están dentro varía de -2 a 2, y la mayoría se aproxima a cero, lo que indica un buen ajuste en este rango. En general, grafique los residuos vs. los valores ajustados sugieren que el modelo de regresión se ajusta bien a los datos, ya que los residuos se distribuyen aleatoriamente cero y tienen una varianza constante. Sin embargo, la presencia de ciertos valores atípico enfatiza la necesidad de revisar estos puntos para determinar si se deben a errores en mediciones o cualquier otra irregularidad que pueda afectar la calidad del modelo.

La Figura 17 de probabilidad normal muestra la relación entre los residuos del modelo y una distribución normal teórica. En el gráfico, los residuos se distribuyen a lo largo de una línea diagonal roja que representa la normalidad esperada. La mayoría de los puntos son se encuentra cerca de esta línea, lo que sugiere que los residuos siguen aproximadamente una distribución normal. Sin embargo, algunos puntos se desvían significativamente de la línea, especialmente en los extremos, que indican la presencia de valores atípicos. Estos pueden resaltar la variabilidad que el modelo no tiene en cuenta correctamente o los errores de medición. En general, aunque la distribución de los residuos es esencialmente normal, la identificación es tratar con valores atípicos puede mejorar la precisión y solidez del modelo.

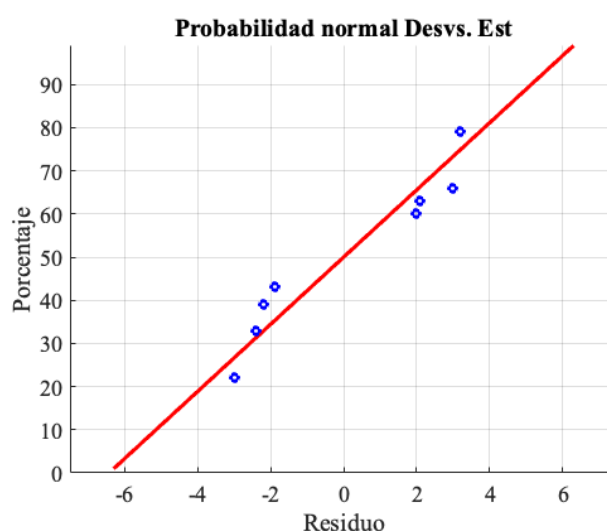


Figura 17. Probabilidad Normal Porcentajes vs Residuo.

La Figura 18 de residuos vs. orden de observación muestra la secuencia de los residuos en el orden en que fueron observados. Los residuos fluctúan significativamente a lo largo de las observaciones, variando entre aproximadamente -4 y 4.



Figura 18. Desviación Estándar Residuos vs Orden de Observación.

La gráfica no muestra un patrón sistemático claro, lo que sugiere que los errores son aleatorios y no están correlacionados en el tiempo. Sin embargo, se observan grandes variaciones en los residuos, lo que puede indicar la presencia de valores atípicos o variabilidad no capturada adecuadamente por el modelo. La ausencia de un patrón específico sugiere que el modelo no presenta problemas significativos de autocorrelación, pero las grandes fluctuaciones indican que puede haber factores adicionales que no han sido considerados en el modelo.

Conclusiones

Los resultados del estudio demostraron que el proceso de soldadura FCAW (Flux-Cored Arc Welding) tuvo mejores resultados en términos de tasa de deposición y versatilidad en posición plana de soldadura en comparación con el proceso GMAW (Gas Metal Arc Welding).

FCAW ha demostrado más eficiencia y flexibilidad en condiciones adversas como soldaduras al aire libre y planas, lo que lo hace ideal para aplicaciones en industria naval.

Además, las pruebas realizadas, incluidas pruebas de tintes penetrantes, ultrasonido y pruebas de tensión, mostraron que FCAW proporciona una mejor calidad y durabilidad de las juntas soldadas y los resultados de ultrasonido revelaron menos defectos y mejor integridad estructural de la soldadura realizada con FCAW en comparación con GMAW.

Las pruebas de tracción también demostraron que las uniones de los FCAW soldados soportan mejor las cargas y proporcionan una mayor resistencia a la tracción.

En resumen, el proceso FCAW no sólo supera a GMAW en términos de desempeño y adaptabilidad en condiciones exigentes, pero también ofrece un mayor nivel de la calidad y durabilidad de la soldadura, convirtiéndola en la mejor opción para aplicaciones en la

industria marina y otras aplicaciones industriales que requieren alta confiabilidad y resistencia.

Se dieron las siguientes conclusiones:

- **Mayor Tasa de Deposición:** FCAW, con su electrodo tubular, proporciona una mayor tasa de deposición, lo cual es crucial para aplicaciones de alta producción y donde se requiere mayor rapidez en el proceso de soldadura.
- **Versatilidad en Posiciones:** FCAW es más adecuado para soldaduras en diversas posiciones, incluyendo vertical y sobre cabeza, siendo ventajoso en la construcción naval donde las soldaduras se realizan en múltiples orientaciones.
- **Menor Sensibilidad a la Contaminación del Gas:** La protección adicional del electrodo tubular en FCAW reduce la sensibilidad a la contaminación por viento, haciendo este proceso más fiable en condiciones al aire libre.
- **Costo-Eficiencia:** A pesar de que el costo inicial del equipo FCAW puede ser más alto, los beneficios en términos de eficiencia y calidad a largo plazo superan la inversión inicial, resultando en un menor costo operativo.

Financiación

Los autores agradecen el apoyo brindado por la Universidad de Guayaquil, durante el transcurso de este trabajo.

Declaración de conflicto de intereses

El autor o autores no han declarado ningún posible conflicto de intereses en relación con esta investigación, la autoría y/o la publicación de este artículo.

Referencias

- [1] D. J. Eyres and G. J. Bruce, *Ship construction*. Butterworth-Heinemann, 2012.
- [2] M. Pelayo, O. Pascal, and G. Lombera, “Cambio tecnológico en la industria naval utilizando el proceso de soldadura de punto por Fricción-Agitación,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 19, no. 3, pp. 61–68, Apr. 2020, doi: 10.18273/revuin.v19n3-2020006.
- [3] F. Pelayo, O. Pascal, E. Sosa, G. Lombera, D. Santiago, and G. Carr, “Desarrollo de un proceso de soldadura de punto por fricción agitación para la industria naval argentina de pequeño porte,” X Congreso Argentino de Ingeniería Industrial, 2002.
- [4] F. Lezzi and L. Costa, “The development of conventional welding processes in naval construction,” *Welding International*, vol. 27, no. 10, pp. 786–797, Oct. 2013, doi: 10.1080/09507116.2012.753256.

- [5] A. Anand, A. Khajuria, and C. Author, “WELDING PROCESSES IN MARINE APPLICATIONS: A REVIEW,” 2013. [Online]. Available: <http://www.ijmerr.com/currentissue.php>
- [6] L. B. Soares *et al.*, “Embedded System for Automation of Linear Welding Robot for Naval and Offshore Industry,” in *2020 IEEE 18th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, IEEE, Jul. 2020, pp. 194–199. doi: 10.1109/INDIN45582.2020.9442170.
- [7] P. D. Gosavi, K. K. Sarkar, S. K. Khunte, V. R. Pawar, and B. Basu, “Microstructure and mechanical properties correlation of weld joints of a high strength naval grade steel,” in *Procedia Structural Integrity*, Elsevier B.V., 2019, pp. 304–313. doi: 10.1016/j.prostr.2019.05.038.
- [8] J. Carlton, *Marine propellers and propulsion*. Butterworth-Heinemann, 2018.
- [9] M. M. El-Gammal, “Review and study of quality management tools in shipbuilding industry.”
- [10] S. Ragu Nathan, V. Balasubramanian, S. Malarvizhi, and A. G. Rao, “Effect of welding processes on mechanical and microstructural characteristics of high strength low alloy naval grade steel joints,” *Defence Technology*, vol. 11, no. 3, pp. 308–317, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.dt.2015.06.001.
- [11] P. Hariprasath, P. Sivaraj, V. Balasubramanian, S. Pilli, and K. Sridhar, “Effect of welding processes on high cycle fatigue behavior for naval grade HSLA joints: A fatigue strength prediction,” *Eng Fail Anal*, vol. 142, p. 106783, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106783.
- [12] C. Churiaque, M. Chludzinski, M. Porrua-Lara, A. Dominguez-Abecia, F. Abad-Fraga, and J. M. Sánchez-Amaya, “Laser hybrid butt welding of large thickness naval steel,” Jan. 01, 2019, *MDPI AG*. doi: 10.3390/met9010100.
- [13] J. J. Kumar, G. Diwakar, and V. V. Satyanarayana, “CORROSION FATIGUE OF WELDED JOINTS IN MARINE AND NAVAL STRUCTURES: A REVIEW.” [Online]. Available: www.tjprc.org
- [14] T. Sathish, S. Dinesh Kumar, K. Muthukumar, and S. Karthick, “Natural inspiration technique for the parameter optimization of A-GTAW welding of naval steel,” *Mater Today Proc*, vol. 21, pp. 843–846, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.600.
- [15] C. Favi, F. Campi, and M. Germani, “Comparative life cycle assessment of metal arc welding technologies by using engineering design documentation,” *Int J Life Cycle Assess*, vol. 24, no. 12, pp. 2140–2172, Dec. 2019, doi: 10.1007/s11367-019-01621-x.
- [16] J. L. Meseguer-Valdenebro, A. Portoles, and E. Martínez-Conesa, “TEACHING OF ASME IX CODE TO STUDENTS OF GTAW, GMAW/FCAW, SMAW AND SAW WELDING PROCESSES,” 2017.
- [17] P. K. Baghel, “Effect of SMAW process parameters on similar and dissimilar metal welds: An overview,” Dec. 01, 2022, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e12161.

Este artículo está licenciado bajo CC BY 4.0.



La licencia CC BY 4.0 permite utilizar, compartir y modificar contenidos con cualquier fin, incluido el comercial, siempre que se cite al autor original, se enlace a la licencia y se indiquen los cambios realizados. Es irrevocable, internacional y no permite imponer restricciones adicionales que limiten el uso del material.