

Construcción de mapas de modos de transferencia de metal para un electrodo en proceso GMAW

Yeiner Mauricio Sanabria^{a*}

a Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Colombia

Resumen

Para construir un mapa de modos de transferencia para el acero inoxidable SAE SS304, se llevaron a cabo diversas pruebas modificando los parámetros principales del proceso GMAW, como el voltaje, el amperaje y la velocidad de alimentación. Durante estas pruebas, se utilizó un analizador de redes para observar el comportamiento de estas variables mientras se creaba el cordón de soldadura. Una vez concluidas las pruebas, no solo se analizaron las gráficas obtenidas por el analizador, sino que también se inspeccionaron visualmente los cordones de soldadura. Para crear un mapa de modos de transferencia más preciso, se complementó este análisis con la observación del sonido producido durante la creación de cada cordón. Este enfoque integral permitió una evaluación exhaustiva y detallada de los modos de transferencia, proporcionando información valiosa para optimizar el proceso de soldadura del acero inoxidable, con el objetivo transversal de obtener el parámetro idóneo para la impresión 3D, usando el proceso de soldadura MIG.

© 2024

Palabras Clave: Soldadura, Acero inoxidable, Impresión 3D, GMAW, modos de transferencia, corto circuito, globular, spray, voltaje, amperaje, MIG, gas protector, parámetros

1. INTRODUCCIÓN

La impresión 3D en acero inoxidable ha revolucionado la fabricación en diversas industrias, permitiendo la creación de piezas complejas con precisión y eficiencia. Sin embargo, esta tecnología enfrenta varias dificultades significativas que limitan su adopción y efectividad. Una de las principales dificultades es la necesidad de mantener un control preciso sobre los parámetros de impresión. El acero inoxidable tiene una alta conductividad térmica, lo que puede provocar distorsiones térmicas durante la impresión. Estas distorsiones pueden resultar en tensiones residuales y deformaciones en las piezas impresas, comprometiendo su integridad estructural y funcionalidad [12].

Otra dificultad significativa es la calidad del polvo metálico utilizado en la impresión. La uniformidad en el tamaño y la forma de las partículas del polvo es crucial para obtener una alta densidad y una buena cohesión entre las capas. Las impurezas o la variabilidad en el polvo pueden llevar a defectos en las piezas finales, como porosidad o inclusiones no deseadas, afectando negativamente las propiedades mecánicas del producto final. [1, 13]

Además, el proceso de impresión 3D en acero inoxidable requiere una atmósfera controlada, generalmente de gas inerte, para evitar la oxidación durante la fusión del polvo. La implementación y el mantenimiento de estos sistemas de atmósfera controlada añaden complejidad y costo al proceso. El post procesamiento es otro desafío importante. Las piezas impresas en 3D a menudo necesitan tratamientos térmicos adicionales para aliviar las tensiones residuales y mejorar las propiedades

mecánicas. Además, el acabado superficial de las piezas impresas puede ser rugoso, requiriendo procesos de pulido o mecanizado adicionales para cumplir con las especificaciones precisas. [1, 14]

La industria metalúrgica ha adoptado la impresión 3D en acero inoxidable como una tecnología innovadora para mejorar la fabricación de componentes complejos y personalizados. Este enfoque ha permitido la creación de piezas con geometrías intrincadas que serían difíciles o imposibles de producir mediante métodos tradicionales [18, 15]. Una de las aplicaciones más notables es en la fabricación de componentes para la industria aeroespacial y automotriz, donde la precisión y la resistencia del acero inoxidable son cruciales. Por ejemplo, la impresión 3D se utiliza para producir piezas de motor y componentes estructurales, reduciendo significativamente el tiempo de producción y los costos asociados a los procesos de fabricación convencionales.[16]

En particular, la tecnología de fusión por láser en lecho de polvo (SLM) y la sinterización directa de metales por láser (DMLS) son ampliamente utilizadas para imprimir aceros inoxidables debido a su capacidad para crear estructuras densas y con alta resistencia mecánica. [15, 16]

El acero inoxidable 17-4 PH es uno de los materiales más populares en la impresión 3D debido a su combinación de alta resistencia y resistencia a la corrosión. Investigaciones recientes han optimizado la composición de este acero para asegurar que las piezas impresas tengan propiedades similares a las de las piezas fabricadas convencionalmente. Esto incluye el control preciso de la solidificación y el enfriamiento rápido del material para mantener su estructura martensítica, crucial para sus propiedades mecánicas. [17]

En el entorno industrial, la impresión 3D mediante SLM (Fusión Láser Selectiva) y DMLS (Sinterizado Directo de Metales por Láser) aún no es muy común debido a su desarrollo continuo y las limitaciones operacionales inherentes a estas tecnologías. A pesar de su potencial, la manufactura aditiva y su adopción a gran escala están restringidas por diversas condiciones técnicas y económicas.

Este artículo propone una aproximación innovadora para la impresión 3D de aceros inoxidables mediante la semiautomatización de equipos robotizados, complementados con equipos de soldadura GMAW. Utilizando como material base el acero inoxidable SAE SS304 de 19.05mm de espesor y como material de aporte el alambre de proceso MIG ER308Lsi con un diámetro aproximado de 0.90 mm, se busca optimizar el proceso de impresión. Las corrientes y velocidades de alimentación serán ajustadas para determinar los parámetros óptimos para la construcción de geometrías en impresión 3D. Para asegurar la precisión y la calidad del proceso, se monitorizarán las variaciones de energía en tiempo real utilizando un analizador de redes, el cual medirá el voltaje (V), la corriente (A), los picos y los factores de cresta. Este enfoque tiene como objetivo mejorar la eficiencia y la viabilidad de la impresión 3D de aceros inoxidables en aplicaciones industriales, proporcionando datos críticos para el ajuste y la mejora continua del proceso.

Nomenclatura

A	Amperaje (unidad de medida)
v	Voltaje (Unidad de medida)
SLM	Fusión Laser Selectiva (Modo de trabajo de impresión 3D)
DMLS	Sinterizado Directo de Metales por Laser (Modo de trabajo de impresión 3D)
GMAW	Método de soldadura
MIG	Método de soldadura
mm	Mimlímetros (unidad de longitud)

2. MARCO CONCEPTUAL

GMAW es un método de soldadura que utiliza un arco eléctrico junto con un electrodo continuo consumible, alimentado automáticamente, y protegido por un gas externo suministrado [1]. Este arco eléctrico genera altas temperaturas, lo que funde tanto el electrodo como el material base, formando así la unión deseada. Durante este proceso, se suministra un gas protector, que puede ser inerte (como argón o helio) o activo (como dióxido de carbono), que rodea el arco y la zona de soldadura. Este gas protege el baño de fusión de la contaminación atmosférica, como el oxígeno y el nitrógeno, que podrían

afectar la calidad de la soldadura. La combinación del arco eléctrico y el gas protector garantiza una soldadura limpia y de alta calidad (Figura 1).

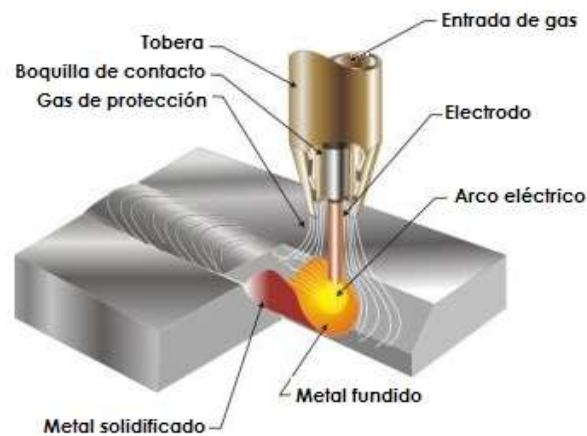


Figura 1. Proceso GMAW [1]

Entre las ventajas de la soldadura GMAW se encuentran su alta velocidad de deposición, su capacidad para soldar una amplia gama de materiales y espesores, y la posibilidad de automatización. Sin embargo, presenta algunas desventajas como la sensibilidad a la contaminación atmosférica, la generación de salpicaduras en algunos casos y la necesidad de un equipo especializado. El control de variables como la velocidad de alimentación del alambre, el tipo y flujo del gas de protección, así como la corriente y tensión del arco, son fundamentales para garantizar la calidad de la soldadura.

En el proceso de soldadura GMAW, diversas variables influyen en la calidad de la soldadura y deben controlarse cuidadosamente para obtener resultados óptimos. Estas variables incluyen la corriente de soldadura, que regula la temperatura del arco y la fusión del material; la velocidad de alimentación del alambre, que determina la cantidad de material depositado y afecta el tamaño del cordón de soldadura; el tipo y flujo del gas de protección, que protege el arco y la zona de soldadura de la contaminación atmosférica; la tensión de arco, que controla la longitud y estabilidad del arco; el tamaño y tipo de electrodo; y la posición de soldadura. Controlar estas variables adecuadamente mediante la configuración precisa de la máquina de soldadura y la técnica del soldador es esencial para lograr soldaduras consistentes y de alta calidad en el proceso GMAW.

El voltaje es uno de los parámetros clave que afecta la calidad y las características de la soldadura. Las principales variables que se pueden controlar, incluido el voltaje, impactan significativamente en la soldadura (Figura 2) y unión de materiales. Los principales efectos del voltaje en este proceso se describen a continuación:

- ✓ **Longitud del Arco y Perfil del Cordón:** El voltaje controla la longitud del arco de soldadura, que es la distancia entre el charco de soldadura fundida y el alambre de relleno en el punto de fusión. A medida que se incrementa el voltaje, el cordón de soldadura tiende a aplanarse y ensancharse. Esto también incrementa la relación entre el ancho y la profundidad del cordón. Un voltaje demasiado alto puede resultar en un cordón plano, cóncavo o con socavado (undercut), mientras que un voltaje demasiado bajo puede producir un cordón convexo y mal formado. [3, 4]
- ✓ **Penetración:** A diferencia del amperaje, que tiene un impacto directo en la profundidad de penetración de la soldadura, el voltaje tiene un efecto menor en la penetración. Sin embargo, puede influir en el perfil de penetración, haciéndolo más ancho, pero menos profundo cuando se incrementa el voltaje. [4, 5]
- ✓ **Arco:** Un ajuste adecuado del voltaje es crucial para mantener un arco estable. Un voltaje excesivo puede causar una piscina de soldadura turbulenta y pobre control del arco, mientras que un voltaje insuficiente puede resultar en arranques de arco deficientes y un control inadecuado del mismo. [6]

- ✓ **Transferencia de Metal:** El voltaje también afecta el modo de transferencia del metal en la soldadura GMAW. Por ejemplo, ajustes de voltaje incorrectos pueden cambiar la transferencia de modo globular a modo de rociado (spray), lo cual afecta la estabilidad del arco y la calidad del soldadura.[3, 5]
- ✓ **Defectos y Reacondicionamiento:** Ajustes inapropiados del voltaje pueden llevar a defectos como socavados o cordones excesivamente reforzados, lo que puede incrementar los costos debido a la necesidad de relleno adicional o trabajo de reacondicionamiento para cumplir con los criterios de aceptación de las normas de soldadura. [5].

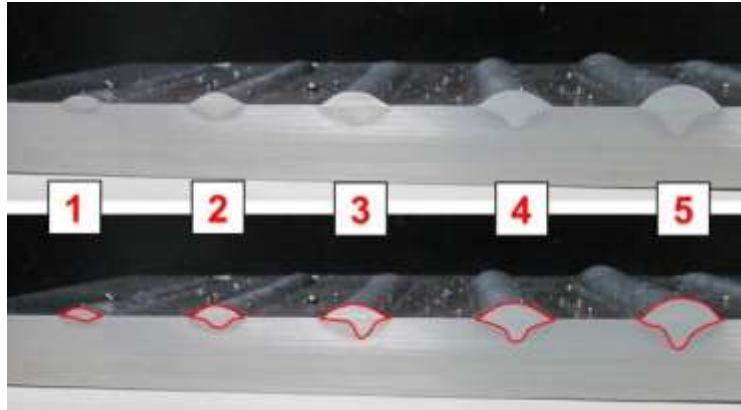


Figura 2. Penetración de la soldadura con variación de voltaje [2]

La velocidad de alimentación del alambre (WFS) es de suma importancia, ya que impacta directamente en la corriente de soldadura y, por consiguiente, en la cantidad de calor generada. A medida que se incrementa la velocidad de alimentación, también aumenta la corriente, lo que puede mejorar la penetración del metal base. No obstante, un suministro excesivo puede ocasionar sobrecalentamiento, salpicaduras y una soldadura desordenada; mientras que una velocidad demasiado baja puede resultar en un arco inestable y problemas al iniciar.

Adicionalmente, la Velocidad de Alimentación del Hilo (WFS) afecta la estabilidad del arco y la transferencia del metal. Un ajuste adecuado permite mantener una transferencia controlada, algo esencial para prevenir defectos como porosidades e inclusiones. También influye en la geometría del cordón de soldadura: una alta velocidad puede producir un cordón ancho y plano; mientras que una baja velocidad puede dar lugar a un cordón estrecho y convexo. Es crucial ajustar la WFS junto con otros parámetros de soldadura para lograr una soldadura óptima y evitar defectos. [3, 7].

En la soldadura GMAW, el tipo de gas de protección utilizado tiene un impacto significativo en la calidad de la soldadura, la estabilidad del arco y las propiedades del cordón de soldadura, para ese caso, se implementa el uso del argón como gas protector [5, 9]. El argón, al ser un gas inerte, proporciona una atmósfera estable alrededor del arco de soldadura, lo que ayuda a mantener una temperatura constante y previene la contaminación del charco de soldadura por el oxígeno y el nitrógeno del aire. Esto es especialmente importante cuando se trabaja con materiales sensibles a la oxidación, como el aluminio y el acero inoxidable. El uso de argón puro o mezclado con pequeñas cantidades de dióxido de carbono (CO₂) o helio puede mejorar la calidad de la soldadura al asegurar una transferencia de metal más suave y una mayor penetración del arco, lo que resulta en soldaduras más limpias y consistentes [8][9].

El argón contribuye a la estabilidad del arco de soldadura, lo que facilita el control del proceso y permite obtener cordones de soldadura de perfil bajo y bien formados. Por ejemplo, una mezcla común en la soldadura es 75% argón y 25% CO₂, conocida como C25, que ofrece una buena combinación de penetración y estabilidad del arco, siendo una opción económica y efectiva para muchas aplicaciones. Sin embargo, para materiales más gruesos o en aplicaciones que requieren mayor penetración y velocidad de soldadura, una mezcla de argón con helio puede ser más adecuada. [5, 9].

Los materiales de aporte para la soldadura por arco con gas metálico (GMAW) suelen presentarse en forma de alambre continuo, y su selección depende del material básico a soldar, así como del ambiente en el que se desarrollará el trabajo, además de las propiedades mecánicas deseables en la soldadura efectuada. Estos materiales se encuentran disponibles en

distintas composiciones de forma que se adapten a las diferentes clases de materiales base, como acero al carbono, acero inoxidable, aluminio, entre otros. Los alambres pueden ser macizos o tubulares.

De entre todos los materiales de aportación para la soldadura por arco que podemos encontrar en el mercado, cabe destacar el MIG-ER308 LSi para acero inoxidable, en el cual “MIG” hace referencia a “Metal Inert Gas” y no a la marca comercial de un fabricante de materiales de aportación. “ER308” significa que el alambre es adecuado para la soldadura de aceros inoxidables 304, y la adición de “LSi” al final de la designación del material “ER308 LSi” hace referencia a que el alambre tiene un contenido en carbono bajo y que contiene silicio, lo que hace que la fluidez del metal de aporte sea mejor y con menor posibilidad de formación de poros.

El silicio, como elemento desoxidante participará en la responsabilidad de mejorar la calidad del cordón, evitando las inclusiones de oxígenos y otros posibles defectos presentes en la soldadura, que ponen en peligro la calidad de la soldadura; por otra parte, es el silicio el que colabora en que haya una buena respuesta del material a las soldaduras. El MIG-ER308LSi ha sido formulado teniendo en cuenta su composición química con el fin de obtener una respuesta buena a su soldabilidad.

La baja cantidad de carbono en este material de aporte es esencial para contener el fenómeno de precipitación de carburos en las zonas afectadas por el calentamiento, lo que evita, en consecuencia, la posibilidad de sufrir corrosión intergranular en las uniones soldadas de aceros inoxidables. De igual manera, los elementos de aleación como el niobio y el cromo ofrecen una matriz estable y resistente a una pluralidad de ambientes corrosivos. Es por ello por lo que el ER308LSi tiene un excelente comportamiento en aplicaciones que requieren grandes resistencias a la corrosión y en las que se requieren magníficos acabados superficiales, como industrias de la alimentación y bebidas, construcción naval y plantas químicas. [10]

En este proceso, el metal de aporte se transfiere a través del arco eléctrico en diferentes formas dependiendo de varios factores operativos como el voltaje, la corriente, el diámetro del alambre y el tipo de gas protector utilizado. Estos modos de transferencia del metal determinan la estabilidad del arco, la apariencia del cordón de soldadura, las propiedades mecánicas de la soldadura, y la presencia de salpicaduras. Los principales modos de transferencia en GMAW son:

- ✓ **Transferencia por cortocircuito (Short Circuit):** En el corto circuito, modo de baja energía, toda la transferencia de metal ocurre cuando el electrodo está en contacto con el charco fundido en la pieza-trabajo. En este modo de transferencia de metal, las características de la fuente de poder controlan la relación entre el establecimiento intermitente de un arco y el corto circuito del electrodo a la pieza. Dado que el calor entregado es bajo, la penetración del cordón de soldadura es muy superficial y debe ser ejercitado en la técnica para asegurar una buena fusión en secciones gruesas. Sin embargo, estas características permiten soldar en toda posición. La transferencia corto circuito es particularmente adaptable para soldar secciones de calibre delgado. [1]
- ✓ **Transferencia globular:** La transferencia globular se distingue por la creación de una gota considerablemente grande de metal fundido en la punta del alambre. Esta gota se va formando hasta que cae en el baño de soldadura debido a su propio peso. Este tipo de transferencia no suele tener aplicaciones prácticas porque es difícil controlar el metal de aporte adecuadamente, lo que puede resultar en una falta de penetración y en espesores excesivos. [11].
Además, la transferencia globular se caracteriza por una tasa de deposición más baja y una estabilidad del arco limitada. La inestabilidad del arco puede causar fluctuaciones en la energía de entrada, lo que lleva a variaciones en la penetración y la calidad de la soldadura. Esta inestabilidad también puede aumentar el riesgo de porosidad y defectos internos en la soldadura.

El tamaño grande de las gotas y su método de transferencia pueden resultar en una dispersión irregular del metal de aportación, afectando negativamente la uniformidad de la soldadura. Para minimizar estos problemas, se suele utilizar un gas de protección con un mayor contenido de CO₂, que puede ayudar a estabilizar el arco, aunque esto puede incrementar la generación de humo y salpicaduras. En general, la transferencia globular es más adecuada para soldaduras en posición plana debido a la influencia de la gravedad en la caída de las gotas.

- ✓ **Transferencia por spray (Spray Transfer):** El modo de transferencia por rociado, o spray transfer, es una técnica avanzada de soldadura GMAW caracterizada por la transferencia de pequeñas gotas de metal fundido desde el electrodo hacia el baño de soldadura a alta velocidad y con gran precisión. Este método se logra utilizando una mezcla de gas rica en argón y una corriente directa con el electrodo conectado al positivo. La clave para activar este modo de transferencia es superar la "corriente de transición", un valor crítico que

permite que las gotas se desprendan de manera continua y uniforme, formando un arco estable y libre de salpicaduras. La transferencia por rociado es especialmente efectiva para soldar metales de mayor espesor y en posiciones horizontales, ya que proporciona una penetración profunda y un cordón de soldadura limpio y homogéneo.

El funcionamiento del modo de transferencia por rociado depende de varios factores, incluyendo la tensión superficial del metal líquido, el diámetro del electrodo, la longitud del electrodo, la temperatura de fusión del metal de aporte y la composición del gas de protección. A medida que la corriente supera el nivel de transición, el electrodo produce cientos de pequeñas gotas por segundo, las cuales son aceleradas axialmente hacia el baño de soldadura, resultando en un proceso altamente eficiente y controlado. Este método reduce significativamente los defectos comunes en la soldadura, como la porosidad y las inclusiones de escoria, y es preferido en aplicaciones industriales donde la calidad y la consistencia son cruciales. [1, 11]

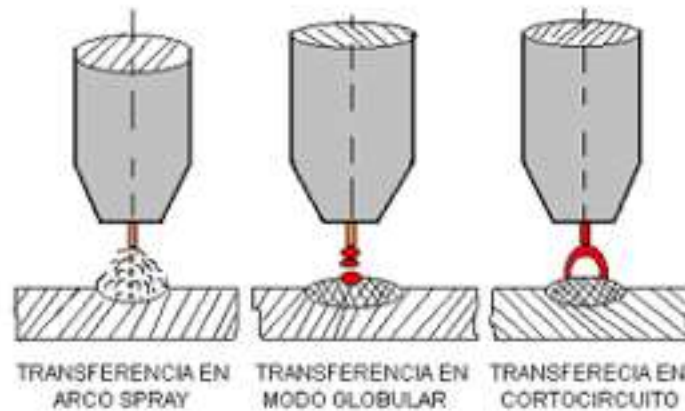


Figura 3. Modos de transferencia GMAW [3]

3. METODOLOGIA

3.1 *Material*es y *Equipo*:

- 3.1.1 **Material Base:** Para el desarrollo de esta investigación se utilizó un acero inoxidable SAE SS304 es uno de los aceros inoxidables más comunes y versátiles, ampliamente utilizado en diversas aplicaciones industriales y comerciales. Este material pertenece a la familia de los aceros austeníticos y está compuesto principalmente de hierro, con una aleación que incluye cromo (18-20%) y níquel (8-10.5%). El contenido de cromo le confiere una excelente resistencia a la corrosión, mientras que el níquel mejora su resistencia a la oxidación y añade ductilidad.

Debido a su combinación de propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión, el acero inoxidable 304 se utiliza en una variedad de aplicaciones, como equipos de procesamiento de alimentos, componentes de maquinaria, recipientes a presión, estructuras arquitectónicas, sistemas de tuberías, y utensilios de cocina [20, 19].

- 3.1.2 **Equipo MIG:** El equipo Kemppi FastMig MXF 67 (Figura 4) es una unidad de alimentación de alambre robusta y versátil, diseñada para uso en aplicaciones industriales de soldadura MIG/MAG. Este alimentador es conocido por su durabilidad y facilidad de uso, siendo ideal para entornos exigentes. Cuenta con una carcasa resistente que protege los componentes internos y un sistema de control de alimentación de alambre preciso que asegura una alimentación constante y uniforme. El MXF 67 puede manejar alambres de 0.6 a 1.6 mm de diámetro y ofrece una velocidad de alimentación ajustable desde 0.5 hasta 25 metros por minuto. Además, está equipado con una pantalla digital clara y controles intuitivos que permiten a los soldadores ajustar los parámetros de manera rápida y eficiente, optimizando la productividad y la calidad del trabajo [21].

El Kemppi FastMig M 420 MW es una fuente de poder modular de alta eficiencia que se integra perfectamente con el alimentador MXF 67, formando un sistema completo de soldadura. Este equipo ofrece una potencia de salida máxima de 420 amperios, permitiendo realizar soldaduras de alta calidad en una amplia variedad de materiales y espesores. La FastMig M 420 MW tiene un rango de corriente de salida ajustable entre 20 y 420 amperios, lo que la hace adecuada para soldaduras ligeras y pesadas. Está diseñada con la última tecnología en inversores, garantizando un rendimiento energético superior y una excelente estabilidad del arco. Además, su interfaz fácil de usar y sus opciones de ajuste avanzadas proporcionan un control preciso sobre los parámetros de soldadura, facilitando así la realización de trabajos complejos con una alta calidad y consistencia [22].



Figura 4. Equipos MIG utilizado [4]

- 3.1.3 **Analizador de redes fluke 434-II:** El Fluke 434-II (Figura 5) es un analizador de calidad de energía trifásico diseñado para ayudar a los ingenieros y técnicos a identificar y resolver problemas de calidad de energía en instalaciones eléctricas. Este equipo es especialmente útil para medir y analizar parámetros eléctricos, identificar pérdidas de energía y evaluar la eficiencia energética. Con capacidades de medición que incluyen voltaje (1 V a 1000 V), corriente (0.5A a 6000A) y potencia (hasta 6000 MW), el Fluke 434-II permite obtener una visión detallada del rendimiento eléctrico de una instalación. El equipo también se destaca por su alta precisión, con una exactitud de $\pm 0.1\%$ para voltaje y $\pm 0.5\%$ para corriente. Es compatible con las sondas de corriente flexibles i430-Flex, que pueden medir hasta 6000 A, y dispone de un analizador de eficiencia de inversores para evaluar la eficiencia de conversión de energía. [23, 24]



Figura 5. Analizador de redes Fluke 434_II [5]

Equipo robotizado: Un cortador automático de acetileno (Figura 6) es una herramienta avanzada diseñada para realizar cortes precisos y eficientes en materiales metálicos utilizando una mezcla de oxígeno y acetileno. Estos dispositivos están equipados con un mecanismo de control semi automático que maneja tanto la velocidad de corte como la dirección del movimiento, garantizando cortes rectos y uniformes. La máquina generalmente incluye un riel de guía que proporciona estabilidad y precisión durante el proceso de corte, y puede ser utilizada para cortes rectos, biselados y en círculos. El principio de funcionamiento de un cortador semi automático de acetileno se puede adaptar para sostener una pistola de soldadura MIG en lugar del cortador de acetileno. Esta adaptación permite que el mecanismo semi automatizado controle el movimiento y la velocidad de la pistola de soldadura, facilitando operaciones de soldadura precisas y eficientes con la misma eficacia y consistencia que se logra en los cortes automatizados. [25]



Figura 6. Equipo robotizado utilizado, cortador de acetileno [6]

3.2 Desarrollo experimental:

3.2.1 **1er Paso:** Se adquirieron varias placas de acero inoxidable SAE SS304 con un espesor aproximado de 19,05 milímetros para realizar una serie de pruebas y recopilación de datos. Sobre estas placas se aplicarán distintos cordones de soldadura utilizando material de aporte ER308Lsi. Para evaluar los resultados, se variarán las condiciones de voltaje, amperaje y velocidad de alimentación de la soldadura, lo que permitirá analizar cómo

estos parámetros afectan la calidad y características de los cordones de soldadura en el acero inoxidable SS304.

- 3.2.2 **2do Paso:** Se instala el analizador de redes FLUKE 434-II para tomar mediciones de corriente y voltaje en el equipo MIG. Para realizar estas mediciones, se utilizan tres conexiones del analizador. Primero, se conecta el terminal L1 para medir el amperaje, rodeando el cable de masa del equipo MIG con una pinza amperimétrica. A continuación, se conecta otra línea de L1 al voltímetro, que va a la salida del módulo de empuje del equipo MIG para medir el voltaje. Finalmente, se realiza la conexión a tierra desde el analizador de redes hasta las pinzas de masa del equipo MIG, asegurando una medición precisa y segura de los parámetros eléctricos del equipo.

Estas conexiones permiten al FLUKE 434-II proporcionar datos detallados sobre el rendimiento eléctrico del equipo MIG, incluyendo la corriente y el voltaje operativos. Al medir directamente en los puntos críticos del circuito, se asegura que las lecturas sean representativas del estado real del equipo durante su funcionamiento. Esto facilita la identificación de posibles problemas eléctricos y la optimización de los parámetros de soldadura para mejorar la calidad y eficiencia del trabajo.

- 3.2.3 **3er Paso:** Después, se preparó el equipo MIG para realizar las pruebas necesarias. El primer paso fue cambiar el gas de trabajo, desconectando la mezcla de CO₂ y conectando una mezcla de argón al 98%. Una vez realizado el cambio de gas, se reemplazó el material de aporte, disponiendo un alambre tubular de referencia ER308Lsi para la soldadura. Finalmente, se configuraron los parámetros iniciales del equipo, ajustando el voltaje y la velocidad de alimentación del alambre para empezar con las pruebas.

Esta preparación meticulosa asegura que el equipo MIG esté optimizado para las condiciones de soldadura específicas que se desean evaluar. El uso de una mezcla de argón al 98% mejora la estabilidad del arco y la calidad de la soldadura, mientras que el alambre ER308Lsi, conocido por su excelente fluidez y baja salpicadura, facilita la creación de cordones de soldadura uniformes y de alta calidad. La configuración inicial de los parámetros de voltaje y velocidad de alimentación es crucial para obtener resultados consistentes y repetibles, permitiendo una evaluación precisa de las diferentes condiciones de soldadura.

- 3.2.4 **4to Paso:** El paso final antes de iniciar las pruebas consiste en posicionar el cortador de acetileno semiautomático para su uso. Una vez en su lugar, se conecta la pistola de acción del equipo MIG al cortador. Luego, se ajusta la altura y el ángulo de la pistola, así como la distancia entre la pistola y el material base. Estos ajustes son críticos para asegurar una soldadura precisa y uniforme. Por último, se desplaza la unidad hacia el punto de inicio donde comenzará el cordón de soldadura.

Este proceso de preparación asegura que todos los componentes estén correctamente alineados y configurados para las pruebas. La correcta posición y ajuste de la pistola de acción del equipo MIG en el cortador semiautomático permite un control preciso durante la soldadura, lo que es esencial para obtener resultados de alta calidad. Al establecer la distancia adecuada y los ángulos correctos, se optimiza la penetración y la consistencia del cordón de soldadura, facilitando la evaluación de los diferentes parámetros y condiciones de soldadura en el material de prueba.

- 3.2.5 **5to Paso:** Después de completar las pruebas, se descargan los datos registrados por el analizador de redes FLUKE 434-II. Estos datos incluyen las mediciones de voltaje y amperaje durante las operaciones de soldadura. Con esta información, se procede a caracterizar los cordones de soldadura, analizando las gráficas obtenidas para entender el comportamiento de la corriente y el voltaje en diferentes condiciones de prueba.

Una vez caracterizados los cordones de soldadura, se establece un mapa de modos de transferencia. Este mapa es fundamental para identificar y analizar los diferentes tipos de transferencia de metal que ocurrieron durante la soldadura, tales como la transferencia por cortocircuito, globular, y por rociado. Analizar estos resultados permite evaluar la calidad de las soldaduras y ajustar los parámetros de soldadura para optimizar los procesos futuros, asegurando así la eficiencia y consistencia en aplicaciones industriales.

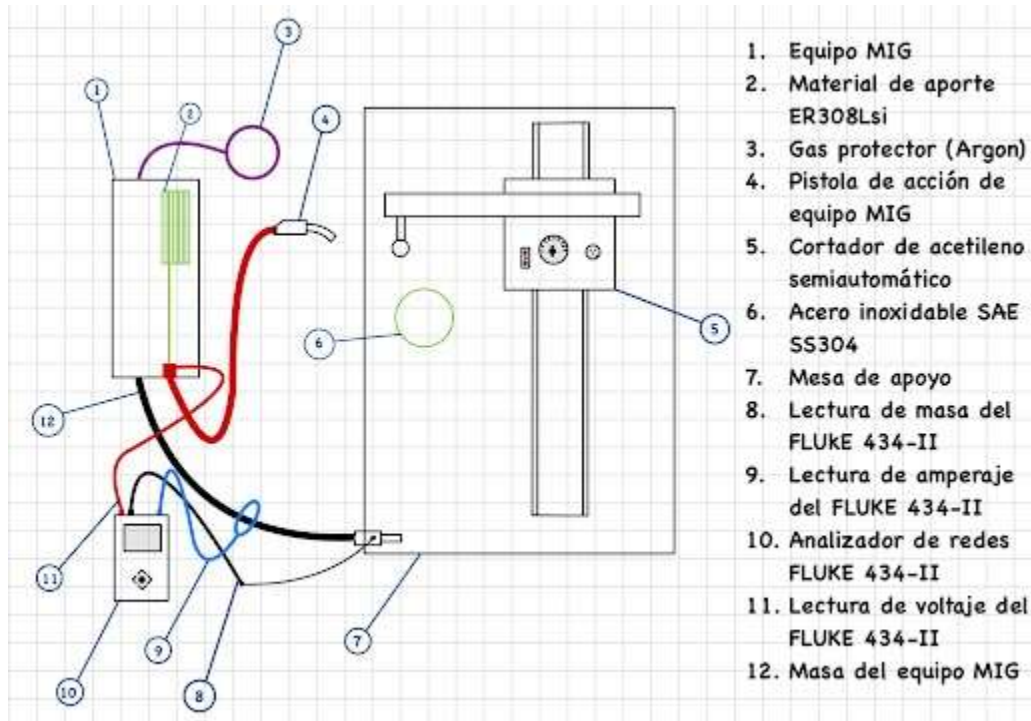


Figura 7. Esquema de equipo de pruebas completo

4. RESULTADOS:

4.1 Primero, se analizan los cordones de soldadura obtenidos para observar su naturaleza y determinar su modo de transferencia. Para ello, se realizó una matriz de trabajo (Tabla 1) que incluyó un total de treinta pruebas. Cada prueba se repitió una vez, resultando en un total de sesenta pruebas. Esta repetición fue realizada con el objetivo de aumentar la precisión en la clasificación de cada cordón según su modo de transferencia.

El análisis detallado de los cordones de soldadura permite reconocer patrones y características específicas correspondientes a distintos modos de transferencia, como el cortocircuito, globular y por rociado o spray. Repetir cada prueba garantiza una mayor fiabilidad en los datos recopilados y reduce la variabilidad, lo que facilita una clasificación más precisa de cada cordón. Esta metodología robusta asegura que las conclusiones obtenidas del análisis sean representativas y útiles para la optimización de los parámetros de soldadura.

Tabla 1. Matriz de trabajo de pruebas

Numero de pruebas	Velocidad de alimentación (m/min)	Voltaje (v)
1 y 2	3	10
3 y 4	3	15
5 y 6	3	20
7 y 8	3	25
9 y 10	3	30
11 y 12	3	35
13 y 14	6	10
15 y 16	6	15
17 y 18	6	20
19 y 20	6	25
21 y 22	6	30
23 y 24	6	35
25 y 26	9	10
27 y 28	9	15
29 y 30	9	20
31 y 32	9	25
33 y 34	9	30
35 y 36	9	35
37 y 38	12	10
39 y 40	12	15
41 y 42	12	20
43 y 44	12	25
45 y 46	12	30
47 y 48	12	35
49 y 50	15	10
51 y 52	15	15
53 y 54	15	20
55 y 56	15	25
57 y 58	15	30
59 y 60	15	35

- 4.2 Cuando Una vez establecida la matriz de trabajo, se inicia el análisis detallado de los comportamientos de los parámetros iniciales durante el tiempo requerido para la producción del cordón de soldadura. Para llevar a cabo este análisis, se emplea el software oficial del analizador de redes Fluke 434-II, conocido como PowerLog. Este software es fundamental para monitorizar y registrar los datos críticos del proceso, proporcionando información precisa sobre los picos mínimos y máximos de los voltajes (V) y corrientes (A), así como la corriente media que se mantiene a lo largo de la operación.

El uso de PowerLog facilita la identificación de variaciones y tendencias en los parámetros eléctricos, permitiendo a los ingenieros comprender mejor las dinámicas del proceso de soldadura GMAW (Gas Metal Arc Welding). Este tipo de análisis es crucial, ya que los voltajes y corrientes juegan un papel vital en la estabilidad y calidad del cordón de soldadura. Por ejemplo, variaciones bruscas en la corriente pueden indicar problemas en la alimentación del material de soldadura o en la configuración del equipo, lo cual podría afectar la integridad del cordón.

En las Figuras 8 a 19, se presenta una selección de las sesenta pruebas realizadas, escogidas al azar para ofrecer una representación gráfica del comportamiento de las variables mencionadas. Esta muestra aleatoria proporciona una visión amplia y detallada del desempeño del proceso bajo diferentes condiciones operativas. Cada figura ilustra cómo los voltajes y corrientes fluctuaron durante las pruebas, destacando tanto los picos como los valores medios que se observaron.

La representación gráfica de estos datos no solo permite una mejor visualización y comprensión de los parámetros críticos, sino que también facilita la identificación de patrones y posibles anomalías. Este análisis exhaustivo es esencial para optimizar el proceso de soldadura GMAW, asegurando que se mantengan los estándares de calidad y eficiencia. Además, el estudio de estas variaciones a lo largo del tiempo ayuda a predecir y prevenir posibles fallos, mejorando así la fiabilidad y consistencia del proceso de soldadura.

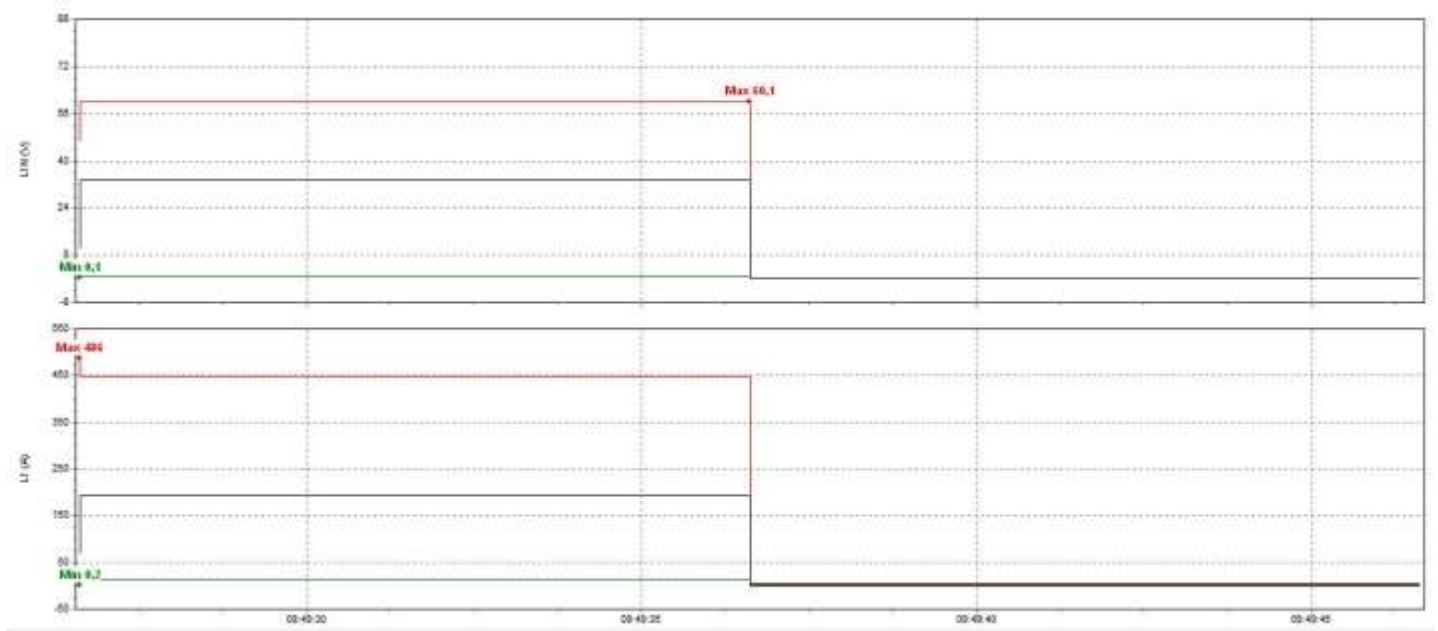


Figura 8. Prueba 1, analizador de redes fluke 434-II

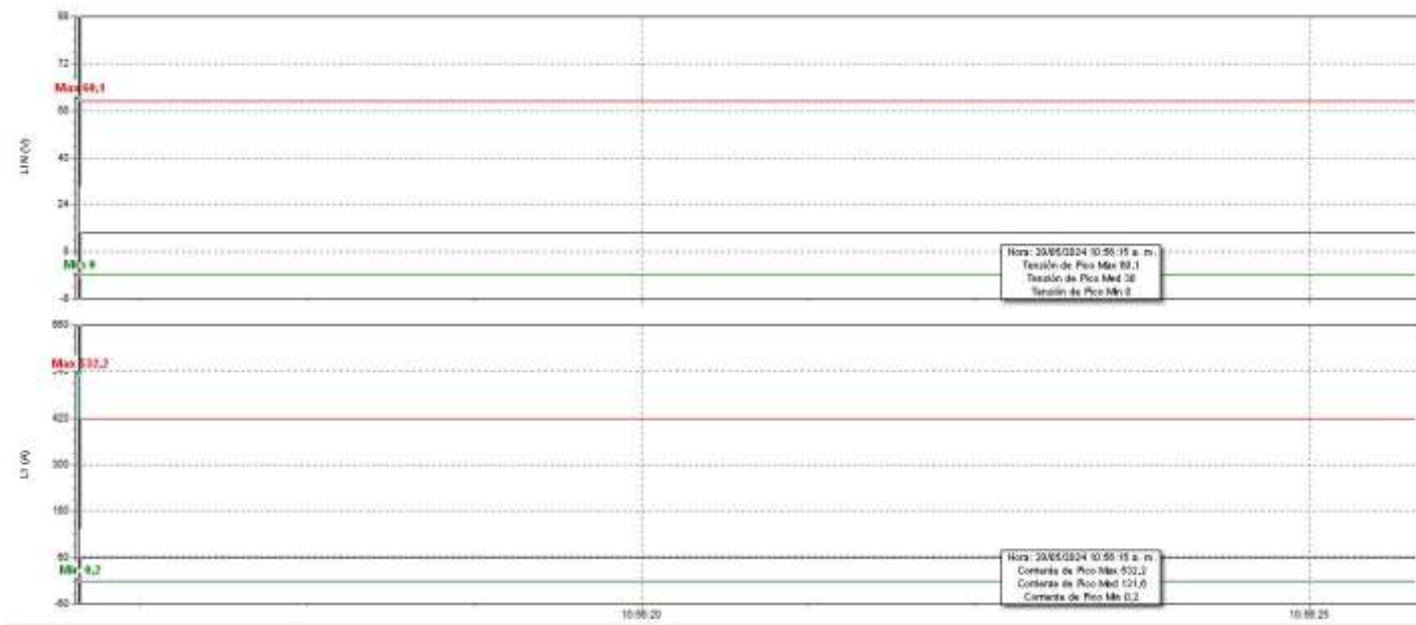


Figura 9. Prueba 6, analizador de redes fluke 434-II

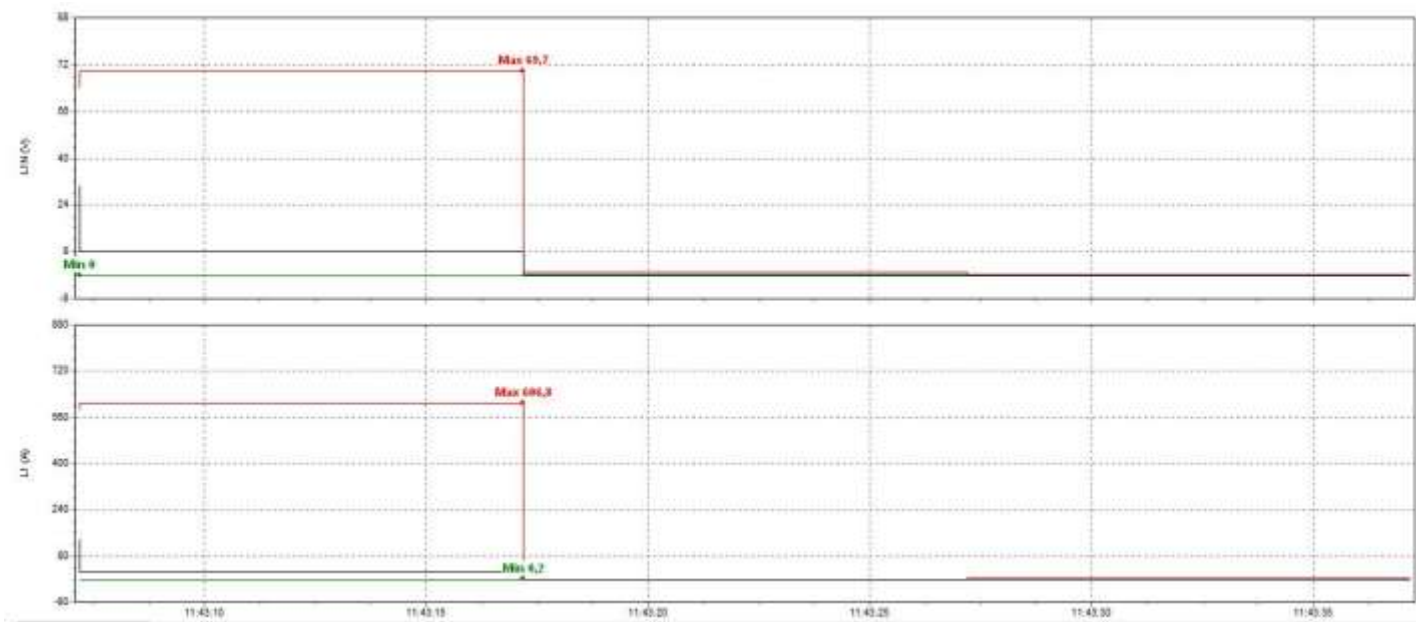


Figura 10. Prueba 12, analizador de redes fluke 434-II

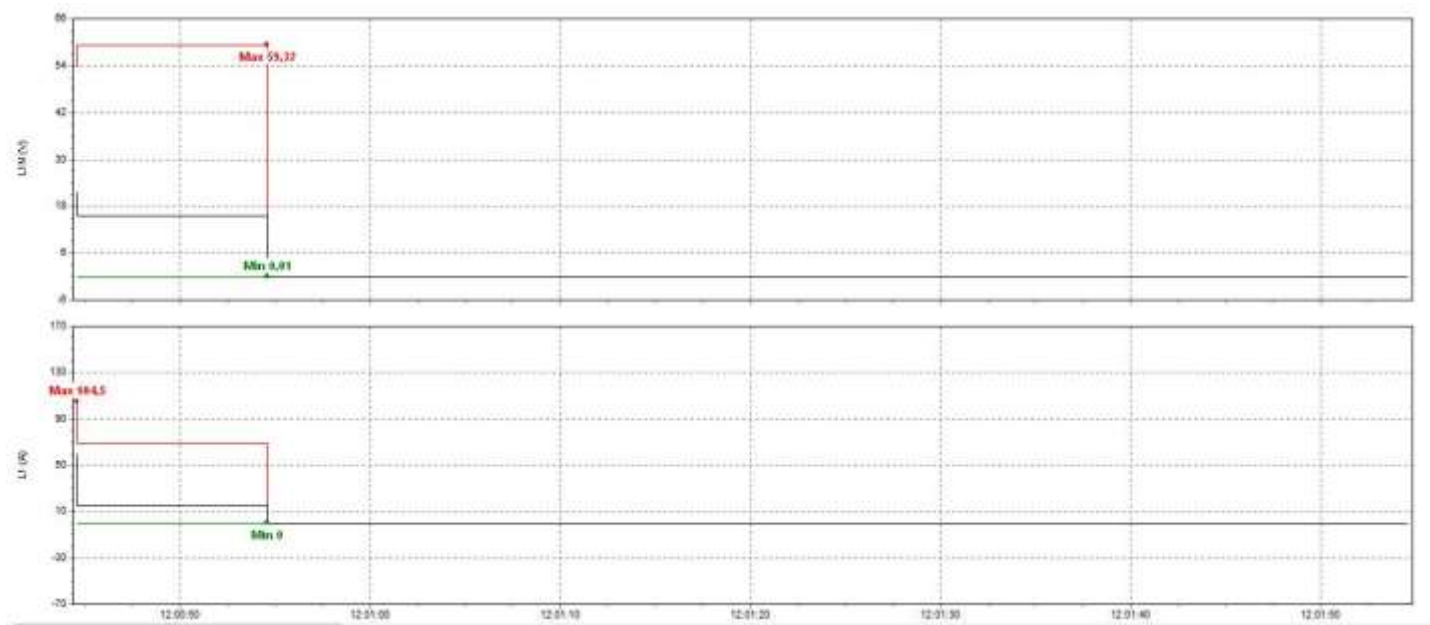


Figura 11. Prueba 16, analizador de redes fluke 434-II

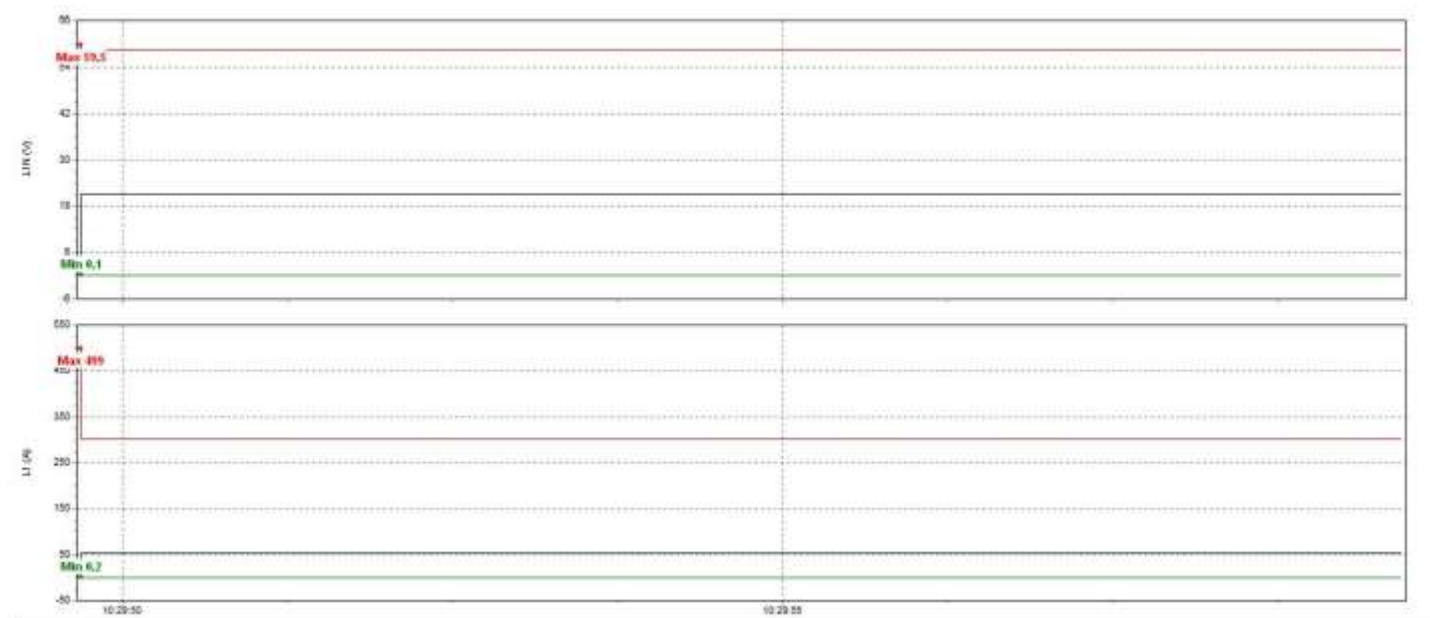


Figura 12. Prueba 24, Analizador de redes fluke 434-II

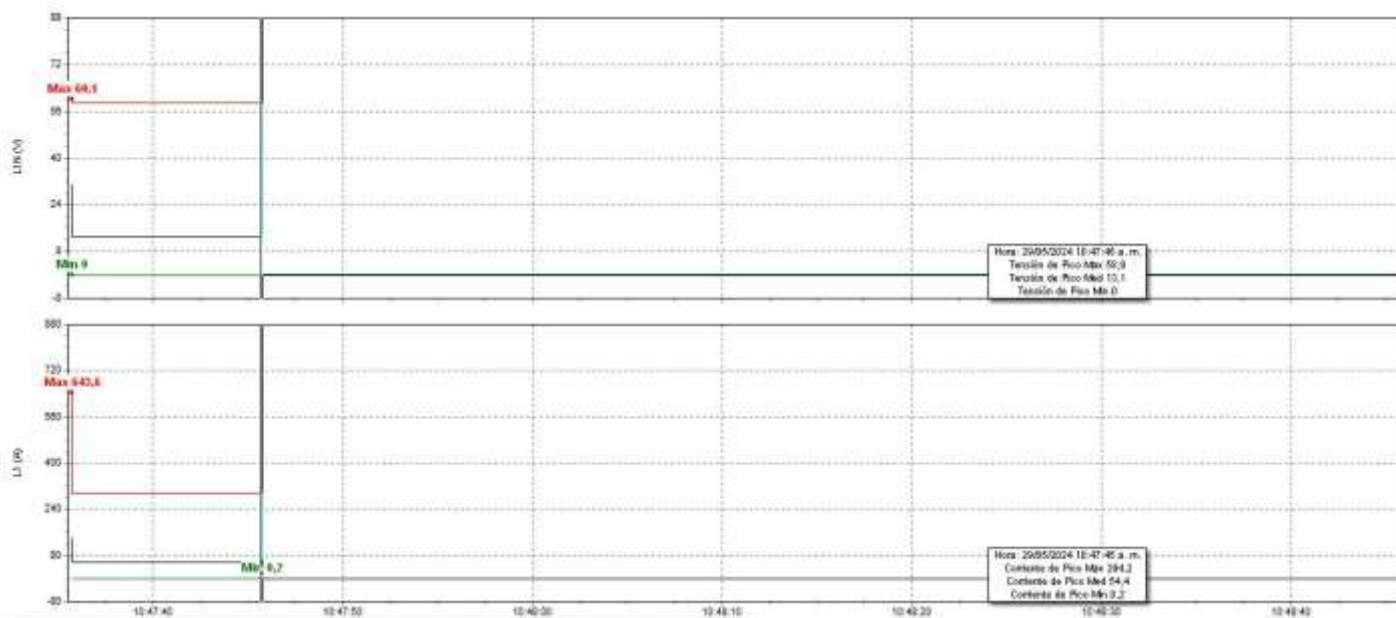


Figura 13. Prueba 30, Analizador de redes fluke 434-II

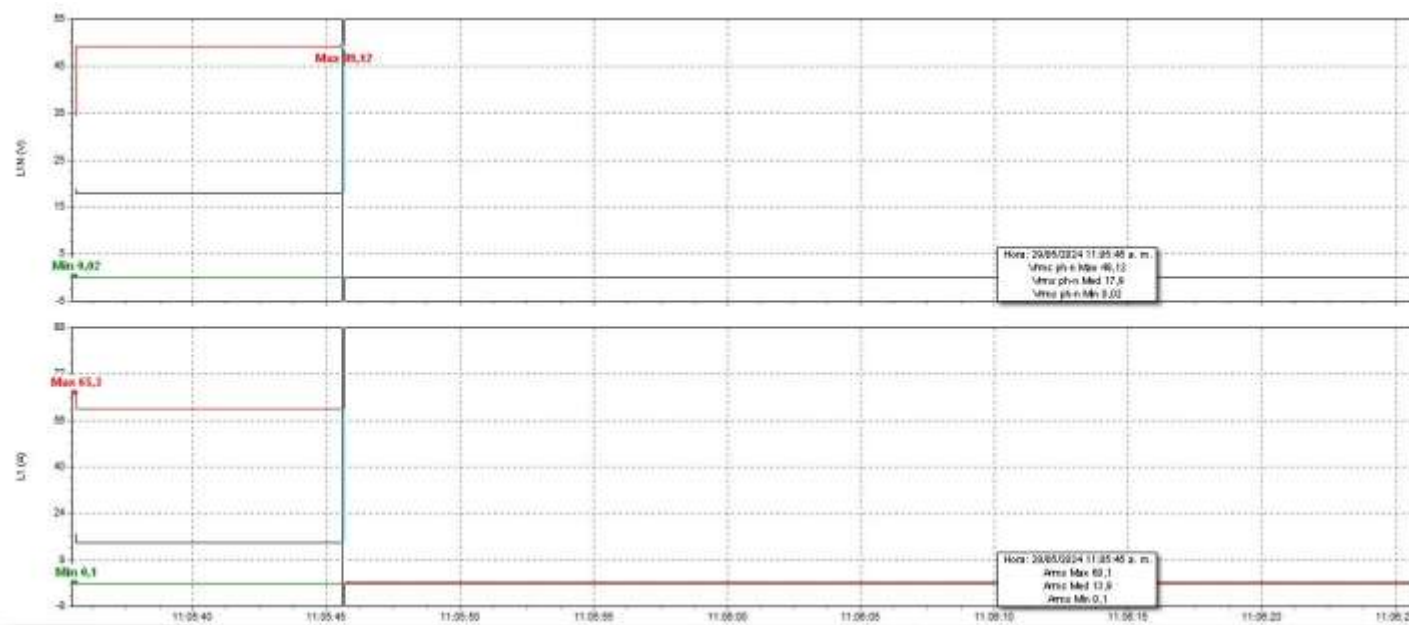


Figura 14. Pruba 36, analizador de redes fluke 434-II



Figura 15. Pruba 42, analizador de redes fluke 434-II



Figura 16. Pruba 42, analizador de redes fluke 434-II

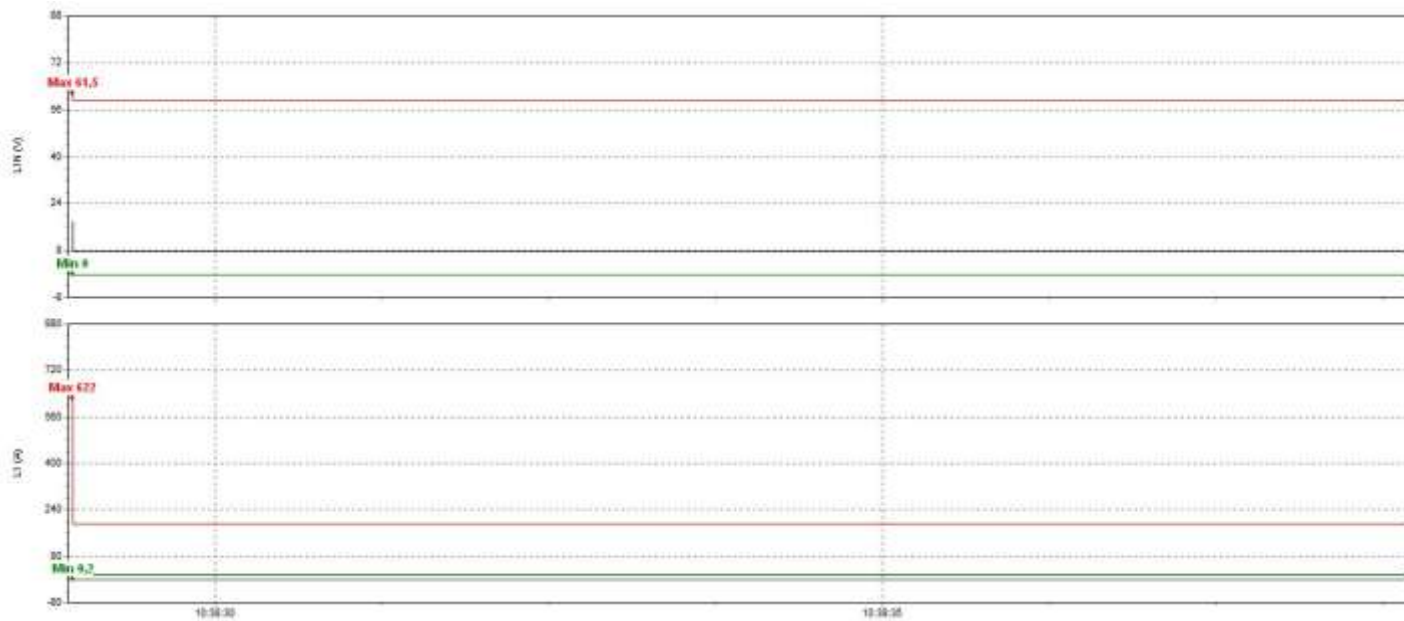


Figura 17. Pruba 48, analizador de redes fluke 434-II



Figura 18. Pruba 55, analizador de redes fluke 434-II

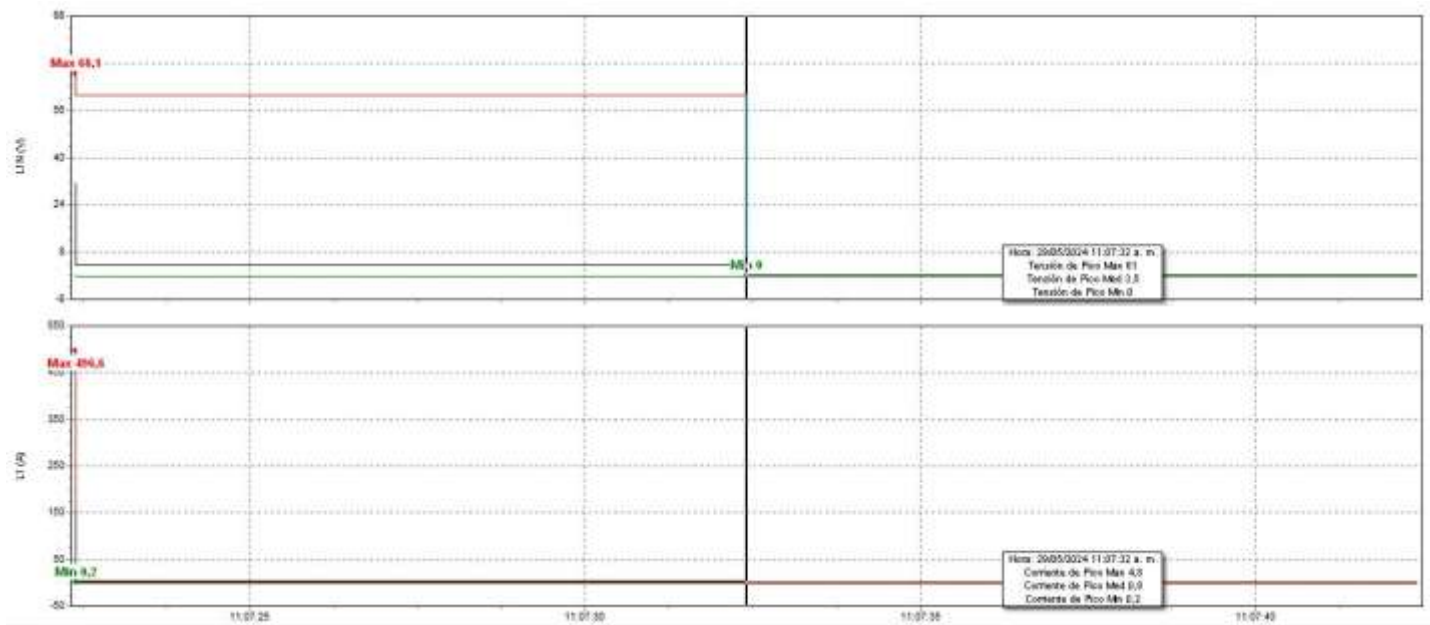


Figura 19. Prueba 58, analizador de redes fluke 434-II

La Tabla 1 actúa como una clave de referencia, ya que en ella se encuentran especificados todos los parámetros utilizados en las pruebas correspondientes a cada una de las gráficas. Esto incluye detalles como el tipo de corriente, los ajustes de voltaje, la velocidad de alimentación del material de soldadura, entre otros factores críticos. Consultar esta tabla permite correlacionar directamente los parámetros con los resultados observados en las gráficas, facilitando un análisis

- 4.3 Una vez completada la matriz de trabajo y estudiadas las gráficas del analizador de redes, se procede a clasificar los cordones de soldadura realizados (ver Figuras 20, 21, 22, 23 y 24). Esta clasificación se basa en una inspección visual detallada, lo que permite determinar el modo de transferencia utilizado en cada cordón. A través de esta inspección, se identifican características específicas que corresponden a los diferentes modos de transferencia, como el cortocircuito, globular y por rociado.

Esta etapa de clasificación es crucial, ya que proporciona información valiosa sobre las condiciones de soldadura bajo las cuales se formaron los cordones. La inspección visual se complementa con los datos obtenidos durante las pruebas, lo que permite una correlación precisa entre los parámetros de soldadura y los modos de transferencia observados. Este proceso garantiza una comprensión profunda de cómo varían los modos de transferencia en función de los ajustes de voltaje, amperaje y velocidad de alimentación, lo cual es esencial para optimizar futuras operaciones de soldadura como lo son la impresión 3D.



Figura 20. Cordones de soldadura con modo de transferencia de corto circuito

El cordón de soldadura en modo de transferencia por corto circuito (Figura 20) presenta un perfil plano y uniforme, con cordones generalmente más estrechos y menor penetración en comparación con otros métodos como el globular o el spray. La superficie acabada es lisa y uniforme, y la baja energía del proceso minimiza las salpicaduras. La penetración moderada a baja hace que este método sea ideal para materiales delgados, evitando perforaciones y distorsiones.



Figura 21. Cordones de soldadura con modo de transferencia combinados de corto circuito y globular

El cordón de soldadura en modo de transferencia combinado corto circuito-globular (Figura 21) presenta un perfil variado que mezcla la uniformidad y planitud del corto circuito con las gotas más voluminosas y penetrantes del modo globular, logrando así buena penetración y mayor volumen de depósito. Aunque la superficie del cordón puede no ser tan uniforme como en el corto circuito puro, mantiene un acabado aceptable con menos salpicaduras comparado con el modo globular puro. La penetración es mayor que en el modo de corto circuito solo, gracias a las gotas globulares que aumentan la profundidad de la fusión, lo que lo hace adecuado para una variedad más amplia de espesores de material.



Figura 22. Cordones de soldadura con modo de transferencia de globular

El cordón de soldadura por transferencia globular (Figura 22) presenta un perfil menos uniforme, con variaciones en altura y anchura debido al tamaño y la frecuencia de las gotas grandes, las cuales también contribuyen a una penetración más profunda en el material base. La superficie del cordón tiende a ser irregular, con una mayor cantidad de salpicaduras y una apariencia más rugosa y protuberante comparada con otros modos de transferencia. La penetración lograda es significativamente mayor que en el modo de corto circuito, aunque menos uniforme debido a la inconstancia en la formación y caída de las gotas, haciéndolo adecuado para materiales de espesor medio a grueso.



Figura 23. Cordones de soldadura con modo de transferencia combinado de globular y spray

El cordón de soldadura por modo de transferencia combinado entre globular y spray (Figura 23) tiene un perfil intermedio, que fusiona la alta penetración y el volumen de las gotas globulares con la uniformidad y consistencia del modo spray, resultando en un cordón con buena penetración y un acabado más suave que el globular puro. La superficie del cordón es más uniforme y lisa gracias a la atomización fina del modo spray, con menos salpicaduras en comparación con la transferencia globular. La penetración es alta, aprovechando tanto las grandes gotas globulares como la transferencia constante y controlada del spray, lo que lo hace adecuado para materiales de espesores medios a gruesos.



Figura 24. Cordones de soldadura con modo de transferencia de spray

El cordón de soldadura obtenido mediante el modo de transferencia spray (Figura 24) presenta un perfil uniforme y consistente, con una penetración profunda y controlada, asegurando una distribución homogénea del metal fundido. Su superficie es muy lisa y tiene un acabado limpio con una mínima cantidad de salpicaduras, gracias a la atomización fina del metal que previene la formación de grandes gotas. La penetración es alta y uniforme, proporcionando una unión sólida y robusta, lo que hace este modo de transferencia especialmente efectivo para soldar materiales de mayor espesor.

- 4.4 Después de clasificar los cordones y conocer los modos de transferencia de cada uno, se procede a crear un mapa de modos de transferencia (Figura 25). Es importante recordar que se utilizó acero inoxidable SAE SS304 como material base y material de aporte tubular de acero inoxidable de referencia ER308Lsi. Este mapa identifica y organiza los diferentes modos de transferencia observados durante el proceso de soldadura, proporcionando una referencia visual de cómo se comportan estos modos en relación con las condiciones de soldadura y las características del cordón resultante. Al comprender cómo interactúan los diferentes parámetros de soldadura con el material base y el material de aporte, se puede optimizar el proceso para lograr los resultados deseados en términos de penetración, apariencia superficial y calidad general de la soldadura.

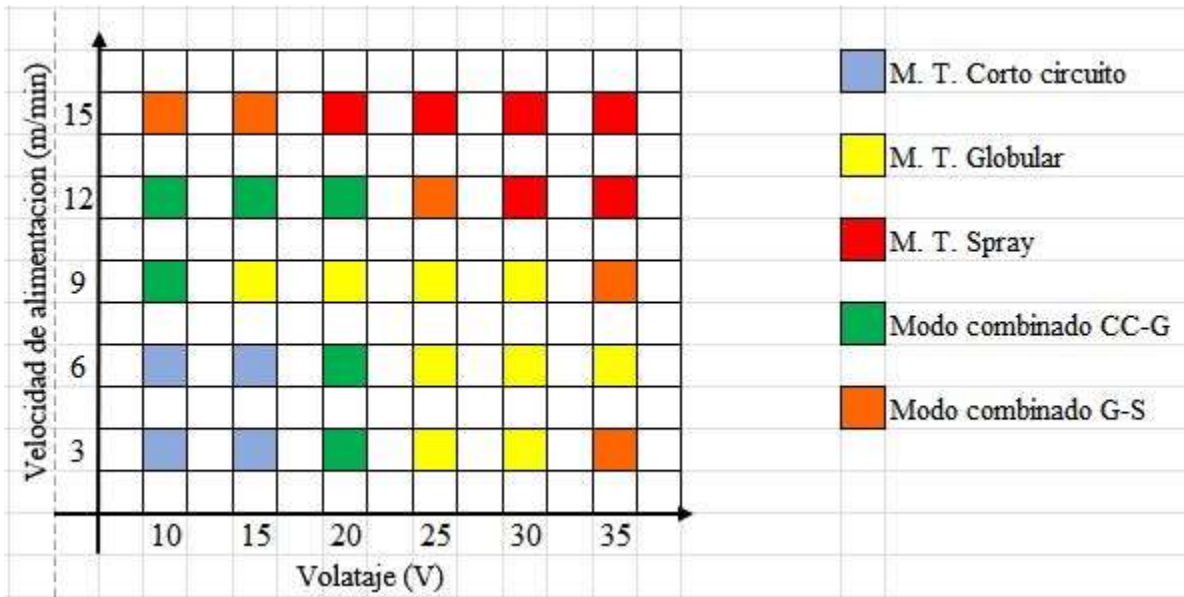


Figura 25. Mapa de modos de transferencia para material base SAE 304, y un aporte ER308Lsi

4.5 La selección de parámetros óptimos en el proceso de soldadura permite la construcción de geometrías complejas, similar al proceso de impresión 3D. Es fundamental que estos parámetros sean precisos para evitar afectar de manera significativa el material base en términos térmicos. Una prueba realizada ilustra cómo la elección adecuada de parámetros puede llevar a la construcción exitosa de estas geometrías. En la Figura 26 se muestra el proceso de construcción de estas paredes, utilizando tanto el material base como el material de aporte de acero al carbono. Este enfoque demuestra la versatilidad de la soldadura para fabricar componentes con formas complejas, destacando la importancia de la configuración adecuada de los parámetros para garantizar la integridad estructural y la calidad del producto final.

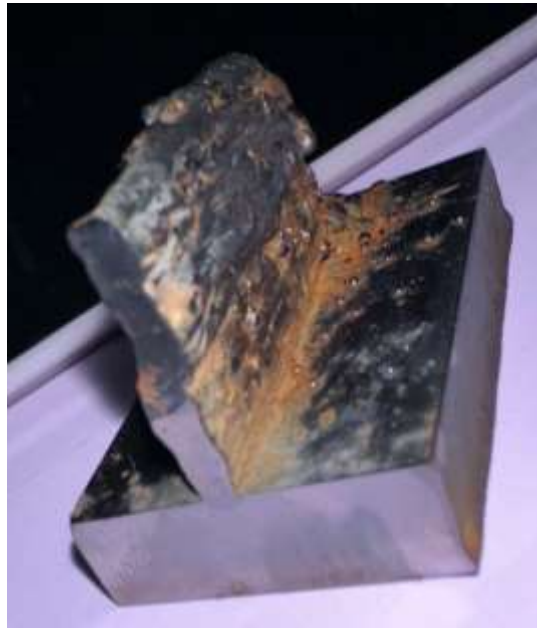


Figura 26. Geometría compleja construida a partir de sobre posiciones de cordones

El control preciso de los parámetros de soldadura durante la construcción de estas geometrías permite la formación de estructuras cristalográficas altamente uniformes. Esta observación se ilustra en las Figuras 27, 28

y 29, donde se muestra la homogeneidad en la disposición de los cristales en las estructuras resultantes. Este nivel de uniformidad cristalográfica resalta la importancia de la precisión en la soldadura para garantizar la integridad estructural y las propiedades mecánicas deseadas en los componentes fabricados.



Figura 27. Metalografía de pared de acero al carbon, tramo 1 (Mas cerca del material base)

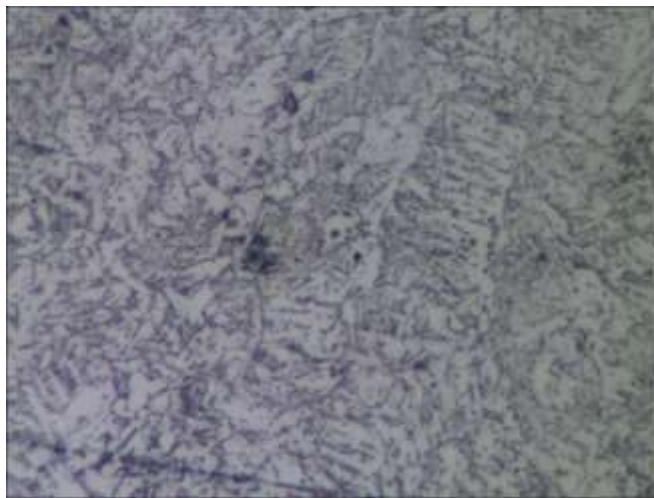


Figura 28. Metalografía de pared de acero al carbon, tramo 1 (En la mitad de la pared de soldadura)



Figura 29. Metalografía de pared de acero al carbon, Material base

5. CONCLUSIONES

5.1 *Conclusión 1:* Aunque la integración de un equipo de corte de acetileno automatizado con un equipo de soldadura Kemppi FastMig puede parecer incoherente inicialmente, debido a las operaciones fundamentalmente diferentes que realizan (corte y unión, respectivamente), esta combinación puede resultar en un sistema de producción de cordones de soldadura altamente automatizado y eficiente, como se ilustra en la Figura 19.

El operador tiene la responsabilidad de determinar la aplicación específica del sistema, considerando variables como el material base, el material de aporte y el gas protector para el proceso GMAW. Es crucial elegir correctamente los parámetros de soldadura en función de las dimensiones y el tipo de material, ajustando la velocidad de alimentación del alambre y el voltaje del equipo de soldadura según la penetración requerida para la pieza. Conocer el propósito final de la pieza soldada es fundamental para realizar estos ajustes correctamente.

La calidad de los cordones de soldadura, que presentarán mejores condiciones para resistir los esfuerzos según su aplicación, será un reflejo directo de la correcta optimización, parametrización y automatización del proceso. En resumen, este enfoque incrementará considerablemente la eficiencia y la calidad del proceso de soldadura, asegurando resultados consistentes y de alta calidad en las uniones soldadas.



Figura 30. Equipo MIG unido a la cortadora de acetileno

5.2 *Conclusión 2:* El control de las variables en un proceso de soldadura GMAW es esencial para evitar efectos no deseados, como el tratamiento térmico no intencional del material, que puede ser el precursor de problemas mayores. La falta de ajuste adecuado de los parámetros de soldadura según la aplicación específica del material puede provocar daños severos o incluso la pérdida completa del material base. Por lo tanto, es crucial analizar el efecto de los parámetros de soldadura sobre la microestructura, los defectos y la dureza de los depósitos obtenidos para asegurar la integridad y calidad del proceso de soldadura.

El análisis detallado de parámetros como la velocidad de avance, la corriente, el voltaje y el flujo de gas es fundamental para comprender su impacto en la microestructura del material. Estos parámetros influyen directamente en la forma en que el metal se funde y solidifica, afectando la distribución de los granos y la formación de fases en el depósito de soldadura. Un control deficiente puede resultar en microestructuras inadecuadas que disminuyen la resistencia mecánica y la durabilidad del material, además de aumentar la susceptibilidad a la corrosión y otros tipos de degradación. Asimismo, una correcta parametrización es crucial para minimizar defectos como porosidades, grietas e inclusiones, que comprometen la integridad estructural del material. La dureza del depósito, que mide su resistencia al desgaste y la deformación, también depende de estos parámetros. Un control preciso garantiza no solo la calidad del depósito de soldadura, sino que también optimiza la vida útil y el rendimiento del componente final, asegurando un proceso de soldadura eficiente y de alta calidad.

5.3 *Conclusión 3:* Los parámetros seleccionados en la matriz de trabajo (Tabla 1) permitieron clasificar y determinar a qué modo de transferencia pertenecía cada cordón de soldadura. A través de una inspección visual, se corroboraron las características de los cordones y se clasificaron en consecuencia. Este proceso de verificación visual aseguró que cada cordón fuera correctamente asignado a su correspondiente modo de transferencia.

Una vez completada la clasificación, la información obtenida permitió crear un mapa de modos de transferencia específico para el material de aporte seleccionado en combinación con el material base. Este mapa proporciona una referencia detallada sobre cómo cada combinación de parámetros de soldadura influye en el modo de transferencia y las características resultantes del cordón, facilitando la optimización y control del proceso de soldadura para futuras aplicaciones.

En conclusión, la clasificación de los cordones de soldadura según el modo de transferencia producido por cada combinación de parámetros es crucial para entender y controlar el proceso de soldadura. La inspección visual y la creación del mapa de modos de transferencia permiten una aplicación precisa y eficiente de los parámetros de soldadura, asegurando la calidad y consistencia de los cordones producidos.

Este enfoque sistemático no solo optimiza la producción, sino que también mejora la comprensión del comportamiento del material bajo diferentes condiciones de soldadura. Al proporcionar una guía clara y detallada, se facilita la toma de decisiones informadas y la implementación de procesos de soldadura que cumplen con los requisitos específicos de cada aplicación, garantizando resultados superiores y reduciendo la posibilidad de errores y defectos.

6. BIBLIOGRAFÍAS

- [1] Mario Granja, Víctor Hugo Hidalgo, “Proceso de soldadura gmaw, para aceros ordinarios al carbón, aceros inoxidables y aluminio”. Julio 2013. (https://www.researchgate.net/profile/Victor-Hidalgo-Diaz/publication/260364241_Proceso_de_soldadura_GMAW_para_aceros_ordinarios_al_carbon_aceros_inoxidables_y_aluminio/links/0f31753699f0035563000000/Proceso-de-soldadura-GMAW-para-aceros-ordinarios-al-carbon-aceros-inoxidables-y-aluminio.pdf)
- [2] Scribd, “Variables del proceso de soldadura GMAW”, 2022. (<https://es.scribd.com/doc/51006519/VARIABLES-EN-EL-PROCESO-DE-SOLDADURAS>)
- [3] EWI, “Conceptos básicos de la soldadura por arco metálico con gas, Parte 1: Corriente y voltaje de soldadura”, Febrero 2024. (<https://ewi.org/gas-metal-arc-welding-basics-welding-current-welding-voltage/>)
- [4] PrimeWeld, “Compresión del voltaje y el amperaje en la soldadura”, 2022 (<https://primeweld.com/blogs/news/understanding-voltage-amperage-in-welding>)
- [5] WeldingAnswer “Efectos del voltaje sobre la calidad de la estructura”, Agosto 2023. (<https://weldinganswers.com/effects-of-welding-voltage/>)
- [6] MillerWelds, “Soldadura MIG, configuración de parámetros correctos”, Abril 2020. (<https://www.millerwelds.com/resources/article-library/miggmaw-101-setting-the-correct-parameters>)
- [7] WeldinTroop, “Soldadura con alimentacion de alambre: Como realizar soldaduras con alimentacion de alambre: Consejos, técnicas, máquinas y configuraciones” (<https://weldingtroom.com/wire-feed-welding/>)
- [8] AIP PUBLISHING “El análisis del efecto del dióxido de carbono y el gas protector argón sobre las propiedades mecánicas de ASTM, un proceso de soldadura GMAW de 36 materiales. ”, Agosto 2023 (<https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/2431/1/140007/2906136/The-analysis-of-carbon-dioxide-and-Argon-shielding?redirectedFrom=fulltext>)
- [9] WeldingPross, “Argón en la soldadura, papel de gas protector para MIG y TIG”, Enero 2023. (<https://weldingpros.net/argon-in-welding/>)
- [10] Lincoln Electric “Azul Max 308Lsi”. 2021 (https://www.lincolnelectric.com/en/Products/bluemaxmig308lsi_gmaw)
- [11] Leopoldo Rios Vargas, “Estudio de los efectos de los parámetros de soldadura robotizada en un componente estructural de aceros desimiles por medio de GMAW”, Octubre 2017. (<https://ciateq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1020/71/1/RiosVargasLeopoldo%20MMANAV%202017%20DEPOSITADA.pdf>)
- [12] Leonel Lira Cortes, S. Garcia Duque, E. Mendez Lago. “Conductividad térmica de metales”, Octubre 2010. (<https://www.cenam.mx/Sm2010/info/carteles/sm2010-c29.pdf>)
- [13] G. Terán, C. Tovar “Estudio de la corrosión producida en aceros inoxidables 304 en procesos de soldadura” Noviembre 2004. (<https://www.redalyc.org/pdf/496/49614407.pdf>).
- [14] Ricaurte Ospina, Héctor Corrales, Hernando Parra. “Soldabilidad en aceros inoxidables y aceros disimiles” Mayo 2007. (<https://www.redalyc.org/pdf/849/84934046.pdf>)
- [15] NEXA3 “Guía de impresión 3D en metal, ¿Qué es y cómo funciona?”, Febrero 2024. (<https://nexa3d.com/blog/metal-3d-printing/>)
- [16] All3DP “Impresión 3D de acero inoxidable: La guía definitiva”, Agosto 2023. (<https://all3dp.com/2/stainless-steel-3d-printer-how-to-3d-print-stainless-steel/>)
- [17] CleanTechnica “Como imprimir en 3D uno de los aceros inoxidables mas resistentes”, 2022. (<https://cleantechnica.com/2022/10/01/how-to-3d-print-one-of-the-strongest-stainless-steels/>)
- [18] Protolabs Networks “Que es la impresión 3D en metales y como funciona” 2023. (<https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-metal-3d-printing/>)
- [19] AZOMateriales “Acero inoxidable grado 304”, Octubre 2001 (<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=965>)
- [20] Engineeringclicks “Propiedades del acero inoxidable 304” Octubre 2017, (<https://www.engineeringclicks.com/304-stainless-steel-properties/>)

- [21] Kempfi Manual “Manual FastMig MXF 63, 65, 67”.
(<https://www.rapidwelding.com/files/Fastmig%20MXF%2063,%2065,%2067%20User%20Manual.pdf>)
- [22] Kempfi Manual “FastMig M regular”. (<https://www.kemppi.com/es-ES/oferta/producto/fastmig-m-regular/pdf/technical-specification/>
)
- [23] Fluke 434-II “Características y descripción”. (<https://www.fluke-direct.com/product/fluke-434-ii-series-ii-energy-analyzer>)
- [24] Fluke 434-II “Características y descripción”. (<https://www.aabtools.com/p/fluke/434-II-INTL/power-quality-and-energy-analyzer>)
- [25] KUKA “Cortador con axiacetileno”. 2021. (<https://www.kuka.com/en-gb/products/process-technologies/oxyacetylene-cutting>)

6.1 BIBLIOGRAFIAS DE FIGURAS.

- [1] <https://soldadurayestructuras.com/soldadura-gmaw/>
- [2] <https://ewi.org/gas-metal-arc-welding-basics-welding-current-welding-voltage/>
- [3] <https://institutoasteco.com/asteco/metodos-de-transferencia-en-el-proceso-gmaw/>
- [4] <https://www.kemppi.com/es-ES/oferta/producto/fastmig-m-regular/pdf/technical-specification/>
- [5] <https://www.fluke-direct.com/product/fluke-434-ii-series-ii-energy-analyzer>
- [6] <https://www.koike.com/ik-12-next-portable-track-guided-muti-attachment-3-in-1-welding-plasma-oxy-fuel-cutting-machine/>