









Mechanical Characterization of a carbon steel wall manufactured with ER70S-6 wire by an in-house Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) process

Caracterización mecánica de una pared de acero al carbono fabricada con alambre ER70S-6 empleando un proceso propio de Manufactura Aditiva con Arco Eléctrico (WAAM)

E.Cepeda- Gómez  ; Y. C. Poveda-Castillo  ; U. García-Zaragoza  ;

C. A. Narváez-Tovar  

DOI: <https://doi.org/10.22517/23447214.25681>

Scientific and technological research paper

Abstract— The additive manufacturing of metals can be made with the same welding techniques used for joining of materials, in this process called Wire Arc Additive Manufacturing WAAM, a heat source melts the filler metal, and it is deposited layer by layer along a predefined path. This Directed Energy Deposition technique is used to manufacture medium to large scale parts that may require subsequent finishing process. To guarantee the quality of the produced parts it is required to assess their mechanical properties which depend on the welding process variables. This paper exposes the study carried out on a carbon steel wall deposited using GMAW and with a ER70S-6 wire. Horizontal and vertical oriented tensile specimens were ma-

chined from the wall according with test method ASTM E8M-21 and mechanical properties were obtained and compared against the values expected by the filler metal specification. Finally, some suggestions are presented that will possibly improve the process aiming to increase yield strength, tensile strength and elongation, especially in the transverse direction to the advance, it requires a greater number of tests throughout the operative range of the equipment used.

Index Terms—ER70S-6, GMAW process parameters, mechanical properties, WAAM.

Resumen— La manufactura aditiva de metales se puede realizar con las mismas técnicas de soldadura utilizadas en la unión de materiales, de manera tal, que una fuente de calor funde el metal de aporte que se deposita capa por capa siguiendo una trayectoria establecida y con ello se manufacturan partes de mediana a gran escala que pueden requerir procesos posteriores de acabado. Para realizar piezas funcionales es importante asegurar su calidad partiendo de sus propiedades mecánicas y que dependen de las

variables propias del proceso de soldadura. En este artículo se presenta el estudio realizado a una pared de acero al carbono depositada con GMAW y con un alambre sólido ER70S-6, comparando las propiedades mecánicas obtenidas en ensayos de tracción contra los valores esperados por la especificación del metal de aporte. La correlación se establece entre los datos obtenidos en los ensayos de tracción que corresponden a las probetas mecanizadas en dos direcciones, horizontal y vertical, cumpliendo la geometría definida en el método de ensayo ASTM E8M-21, de manera que al final se presentan algunas sugerencias que posiblemente permitirán mejorar el proceso para que se aumente la resistencia a la fluencia, la resistencia a la tracción y el porcentaje de elongación sobre todo en el sentido transversal a la dirección de avance, requiriendo para ello un mayor número de pruebas en todo el rango de trabajo de los equipos utilizados.

Palabras claves—ER70S-6, parámetros del proceso GMAW, propiedades mecánicas, WAAM.

I. INTRODUCCION

La manufactura aditiva (AM), es el proceso de unión de materiales, usualmente capa por capa, para fabricar objetos a partir de un modelo 3D. Su principio de funcionamiento se presenta como opuesto a los procesos de manufactura subtractivos y puede establecerse como complementario a las técnicas actuales de manufactura [1]. De las siete categorías diferentes clasificadas por el comité F42 de ASTM [2] únicamente la deposición de energía dirigida DED, la fusión de

This manuscript was submitted on June 28, 2021, accepted on September 12, 2022 and published on octubre 22 2025.

Este trabajo es derivado del proyecto “Desarrollo de un sistema de manufactura híbrida para fabricación de componentes metálicos de mediana escala. Fase I: Prototipado del proceso de manufactura aditiva por soldadura de arco (WAAM)” que se desarrolla en la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, y de la tesis de pregrado “Desarrollo de un simulador de manufactura aditiva por soldadura por arco (WAAM) para el centro de mecanizado Leadwell V20i de la Fundación Universitaria Los Libertadores”

E. Cepeda Gómez, es profesor del programa de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad de San Buenaventura y estudiante de la Maestría en Ingeniería – Materiales y Procesos en la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, Colombia. (e-mail: ecepedag@unal.edu.co).

Y.C. Poveda Castillo, es profesora asistente del programa de Ingeniería Mecánica de la Fundación Universitaria Los Libertadores (e-mail: ycpovedac@libertadores.edu.co).

U. García Zaragoza, es profesor del programa de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad ECCI (e-mail: ugarciatz@ecc.edu.co).

C.A. Narváez-Tovar, es profesor asociado del Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Colombia. (e-mail: canarvaezt@unal.edu.co).



lecho de polvos PBF y el laminado de hojas SL permiten la producción de partes metálicas en una sola etapa, y solamente la deposición de energía focalizada DED, emplea la adición de metal de aporte [3]. Los parámetros principales en la manufactura aditiva DED están relacionados con el tipo de materia prima (polvos o alambre) y la fuente de energía térmica (láser, un haz de electrones o arco eléctrico) [1], requiriendo un suministro adecuado de la materia prima y su manipulación, Almacenamiento y reutilización ceñido a lo declarado por el fabricante [4].

En los procesos DED, la energía térmica funde los materiales que se van depositando y cuando se emplea como fuente de energía el arco eléctrico se hace referencia a un proceso de manufactura Aditiva por Soldadura (WAAM, Wire Arc Additive Manufacturing) [1],[5]. WAAM utiliza las herramientas de soldadura con arco eléctrico y un alambre metálico de aporte con una tasa de deposición estimada de 4 a 9 kg/h para construir componentes enteramente formados de metal de soldadura de mediana y gran escala, con baja a mediana complejidad geométrica y con rugosidades de 0,5 mm típicamente; por ello se considera un proceso de forma

aproximada e implica algún mecanizado adicional para obtener la forma y acabado final. Es el proceso DED de menor costo, porque utiliza equipos estándar y materiales cuya tecnología está ampliamente adoptada por la industria metalmeccánica [6].

Dentro de los procesos de soldadura adecuados para implementar un sistema WAAM, se encuentran los de alambre continuo sólido (GMAW) o tubular (FCAW). Para proteger el metal que se deposita se emplean gases industriales que evitan que los gases del medio circundante afecten las propiedades mecánicas, disminuyendo las discontinuidades y haciendo que el arco eléctrico sea estable. El voltaje, la intensidad de corriente y la velocidad de avance son algunos de los parámetros fundamentales. Algunos fabricantes de equipos han desarrollado modificaciones a los tipos de transferencia que se originan en GMAW, por ejemplo, la transferencia de metal fría CMT desarrollada por Fronius, quienes aseguran que se traslada menos calor al depósito al controlar los parámetros eléctricos de una manera diferente a los procesos convencionales de soldadura. [7]. Por otro lado, los metales de aporte que se suelen utilizar son de distribución comercial y producidos por la industria de la soldadura, disponibles en forma de rollos de alambre y en un amplio rango de aleaciones. En aleaciones de aluminio y de acero, aún los procesos convencionales de conformado son los preferenciales, en general los depósitos de aluminio con manufactura aditiva tienen menores propiedades mecánicas comparadas con las piezas obtenidas por mecanizado, esta condición se supera al procesar posteriormente a través de un tratamiento térmico que refine la microestructura [8].

Los desarrollos previos del proceso WAAM datan del año 1920 cuando se patentó el uso de electrodos consumibles para conformar artículos decorativos [9], más adelante, la realización de recargues (cladding) con soldadura y en 1967,

Akira Ujiie, patentó la fabricación de recipientes de sección transversal circular empleando únicamente metal de soldadura [10]. En 1983, se empleó SAW en tándem con una tasa de deposición de 20 kg/h, y posteriormente, Rolls Royce junto con la Universidad de Cranfield, en la década de 1990, mostraron su interés en la elaboración de componentes de motores aeronáuticos con Ti-6Al-4V e Inconel 718 [3]. Más recientemente, investigadores de la start-up Arup y el Imperial College London, a través del The Alan Turing Institute – Lloyd's Register Foundation, diseñó, modeló, construyó y ensayó el primer puente metálico en acero inoxidable fabricado con WAAM [6]. Actualmente, WAAM es un proceso que está siendo usado por la industria aeroespacial para la fabricación de componentes con alta relación BTF (buy to fly), así como la industria militar y naval para fabricar repuestos y llevar a cabo reparaciones de componentes fracturados [11], [12], [13].

Uno de los desafíos en los componentes fabricados con WAAM es la evaluación de la influencia del proceso de soldadura en sus propiedades mecánicas, de manera que la resistencia a la fluencia y a la tracción, de un acero fabricado por AM sea comparable con la de un acero convencional [7], [8]. Las propiedades de tracción pueden diferir hasta un 10% para diferentes orientaciones y la resistencia puede ser mejorada al incrementar la corriente del arco de soldadura. Por ejemplo, el trabajo de Ermakova et al. [14] emplearon el proceso GMAW con CMT (Cold Metal Transfer) para hacer los depósitos capa a capa sobre un acero estructural EN 10025, con un patrón oscilante para obtener una pared de 24 mm de espesor. Este tipo de trayectoria redujo la probabilidad de fusión incompleta, pero aumentó la entrada de calor. De los ensayos a tracción en sentido horizontal y en sentido vertical de acuerdo con ASTM E8M a temperatura ambiente, encontraron que la deformación en la fractura es ligeramente mayor en las probetas horizontales, la resistencia a la fluencia es menor 6,8% en las probetas verticales y la resistencia a la tracción es similar pero ligeramente menor en el sentido vertical [14]. Por otro lado, Haden et al. [15] configuraron un sistema WAAM de bajo costo empleando una máquina de soldar Millermatic 250 con un posicionador tipo gantry, empleando el software de código abierto *Slic3r engine* para el código G, para depositar paredes de 212,6 cm de longitud, 11,5 cm de altura y 0,6 cm de espesor, con alambre ER70S-6 de 0,9 mm de diámetro, sobre una platina de ASTM A36, con 19V, velocidad de alimentación de 5 080 mm/min y un avance de 152 mm/min. Cada capa se realizó en la misma dirección con un gas de protección 75% Ar y 25% CO₂, con un caudal de 30 CFH. A partir de la pared, mecanizaron probetas de tracción de acuerdo con ASTM A370-13 y las ensayaron obteniendo un comportamiento en la resistencia a la fluencia muy similar al obtenido de un ASTM A36 y sin diferencias significativas entre resultados de probetas mecanizadas en sentido horizontal y vertical [15].

En el contexto latinoamericano también se han llevado a cabo investigaciones en las que se configuran sistemas WAAM integrando equipos de soldadura y CNC. Por ejemplo, el trabajo de Frago Poblano [16] utilizó un dispositivo de control numérico computarizado CNC para automatizar el movimiento de la antorcha MIG PF 250 de un equipo de soldadura MIG MM 252 de INFRA, empleando alambre de acero al carbono de 0,9

mm de diámetro y una alimentación de 7,056 m/min, mientras que el trabajo de Cervantes et al. [17] utilizó el software Match 1, un router CNC, una máquina de soldar para GMAW y el metal de aporte ER70S-6 de diámetro 0,8 mm. Cada probeta de tracción se manufacturó depositando 6 capas, la distancia entre la antorcha y la pieza de 8 mm, amperaje de 80 A, voltaje de 35V, velocidad de avance de la antorcha de 1,1 m/min, velocidad de alimentación de 15 m/min y caudal de gas de 15ft³/h. Las probetas de tracción se mecanizaron de acuerdo con ASTM E8M-04 y los ensayos se realizaron a temperatura ambiente de 20°C, obteniendo una resistencia a la fluencia entre 258,0 MPa y 358,1 MPa, resistencia a la tracción entre 402,7 MPa y 493,2 MPa, que en promedio fue ligeramente superior a la especificada para el metal de aporte ER70S-6 [17].

En Colombia, el estudio de la ANDI e iNNpulsa indica que los sectores automotriz y metalmeccánico deben realizar inversiones y desarrollos propios para cerrar la brecha tecnológica de la manufactura 3D, especialmente en la de materiales metálicos [18]. De todas las tecnologías aditivas, la adopción de WAAM por la industria colombiana tiene una alta factibilidad de éxito debido a que puede realizarse sin requerir una alta inversión inicial en equipos, y puede aprovechar la capacidad instalada y

El capital humano capacitado en CNC y soldadura. Por lo anterior, el objetivo de este artículo es presentar la caracterización mecánica de paredes de acero al carbono ER70S-6 fabricadas con un equipo de soldadura GMAW convencional adaptado a un centro de mecanizado CNC. La sección de metodología describe las pruebas semiautomáticas, continuas, de deposición de cordones individuales y de solape realizadas con el fin de establecer un intervalo de parámetros de proceso que produjeran apariencia uniforme, ancho constante y baja convexidad de los cordones depositado, así como el proceso de deposición de una pared de longitud 220 mm, altura 115 mm y ancho 36 mm, de la cual fueron cortados bloques horizontales y verticales para mecanizar las probetas a tracción. La sección de resultados presenta las propiedades mecánicas obtenidas de los ensayos de tensión de acuerdo con la norma ASTM E8M-21. Finalmente, la sección de conclusiones correlaciona los parámetros de proceso con las propiedades mecánicas obtenidas, realiza sugerencias para mejorar el proceso y formula líneas de trabajo futuro.

II. METODOLOGÍA

A. Selección del material y proceso de fabricación:

1) Descripción del proceso de soldadura

GMAW es un proceso de soldadura por arco eléctrico generado entre un electrodo metálico continuo y el charco de soldadura, con un gas suministrado externamente que actúa como protección y no requiere la aplicación de presión. Al combinar de manera adecuada el gas de protección, metal de aporte y variables de soldadura es posible soldar metales como aceros al

carbono, aceros de baja aleación, aceros inoxidables, aluminio, cobre, titanio y aleaciones de níquel [19].

2) Equipos

La máquina de soldadura regula automáticamente las características eléctricas del arco (tensión y velocidad de alimentación), el soldador o un equipo adicional genera la velocidad de avance y la dirección de la antorcha. El equipo de soldadura está compuesto por la antorcha de soldadura con sus accesorios, la unidad de alimentación, el control de soldadura, la fuente de poder, el regulador del gas de protección y el suministro de gas a través de un cilindro de alta presión [19]. En este trabajo se utilizó una máquina de soldadura Speedtec 200C con antorcha LGS 250G del fabricante Lincoln Electric.

Para desplazar automáticamente la antorcha y depositar la pared se empleó un centro de mecanizado CNC Leadwell V-20i. Para acoplar la antorcha al husillo del centro de mecanizado se empleó un portaherramientas disponible y se diseñó un aditamento que emplea unión atornillada para sujetar la antorcha por presión y permite el giro libre del husillo respecto a la antorcha [20]. El aditamento se muestra en la figura 1. La generación del código G correspondiente a las trayectorias de deposición que debe seguir la antorcha en cada una de las capas de la pared se obtuvo empleando un simulador del proceso desarrollado en el software SprutCAM [20].

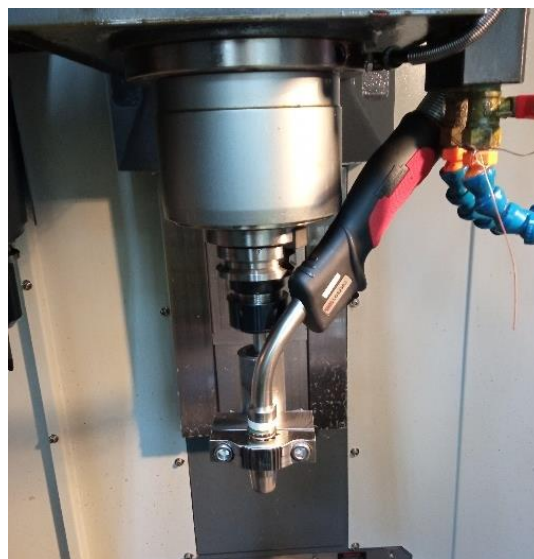


Fig. 1. Sistema de sujeción de la antorcha.

3) Metal de aporte

El alambre corresponde a la especificación AWS A5.18, y a la clasificación ER70S-6. Este alambre se destina para soldaduras de capa sencilla o múltiple, adecuado para aplicaciones donde se requiere cordones lisos y se puede utilizar con rangos de corriente altos con gas de protección CO₂ o mezclas de argón y oxígeno o argón y CO₂ [21]. La composición química típica del metal de soldadura

TABLA I
EQUISITOS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA PARA ELECTRODOS SÓLIDOS
Y VARILLAS

Clasificación AWS A5.18 [A5.18M]	Porcentaje en peso ^a									
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
ER70S-6	0.06-	1.40-	3.80-	0.025	0.035	0.15	0.15	0.15	0.03	0.50
ER49S-6]	0.15	1.85	1.15							

^aLos datos sencillos son valores máximos[21]

TABLA II
REQUISITOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS TAL COMO SE SUELDA

Clasificación AWS A5.18 [A5.18M]	Gas de protección ^a	Resistencia a la tracción, psi [MPa]	Resistencia a la fluencia ^b , psi [MPa]	Porcentaje de elongación ^c	Resistencia al impacto (promedio mínimo) a 20 °F [30 °C]
ER70S-6	CO ₂	70 000 [490]	58 000 [400]	22	20 ft lb [27 J]
ER49S-6]					

^a El uso de un gas de protección en particular para propósitos de clasificación no se debe interpretar como una restricción al uso de otras mezclas de gases. Un metal de aporte ensayado con otra mezcla de gas de protección puede resultar en un metal de soldadura con diferentes propiedades mecánicas.

^b Resistencia a la fluencia al 0,2% de desplazamiento.

^c Porcentaje de elongación en 2 in [50 mm] de longitud de galga o 1,4 in [36 mm] de longitud de galga para probetas de tracción de 0,250 in [9,0 mm] recomendadas. [21]

depositado se describe en la Tabla I, mientras que la tabla II resume las propiedades mecánicas de los depósitos que pueden obtenerse con este alambre. Específicamente para este trabajo, se empleó alambre de 0.8 mm de diámetro.

4) Gas de protección

El gas es indispensable para que el proceso de soldadura se realice de manera apropiada, incide en el desempeño del proceso de soldadura y el potencial de ionización permite el inicio y la estabilidad de arco a partir de los componentes del gas. [22]. Durante el proceso de fabricación de la pared se empleó como gas de protección 100% CO₂ del fabricante Cryogas, ya que el CO₂ es un gas activo que se suele emplear en GMAW por su menor costo por unidad de volumen; sin embargo, el costo final dependerá adicionalmente del contorno del cordón, de la salpicadura y su remoción, puesto que la menor eficiencia de deposición causada por los humos generados y las pérdidas por salpicaduras pueden influir el coste final. [22].

5) Variables del proceso

Las variables del proceso son la corriente de soldadura que varía directamente con la velocidad de alimentación del alambre, la polaridad del electrodo, que en la mayoría de aplicaciones y modos de transferencia se obtiene con corriente directa electrodo positivo (DCEP), el voltaje del arco, la velocidad de avance, la extensión del electrodo, que típicamente oscila entre 6 mm a 13 mm para corto circuito, la orientación del electrodo, el diámetro del alambre que influye en la configuración del cordón de soldadura, y la composición y caudal del gas de protección. La selección de los parámetros requiere de experimentación para encontrar las condiciones adecuadas y esta tarea no es sencilla por la interdependencia de muchas de estas variables. [19].

B. Desarrollo experimental

1) Pruebas de deposición con parámetros iniciales

A partir del manual de la máquina y de la ficha del metal de aporte generados por el fabricante, se realizaron pruebas semiautomáticas para determinar los valores iniciales de prueba que resultaron en velocidad de alimentación 8 m/min, tensión de salida 24 V, velocidad de avance 250 mm/min y caudal de gas 15 L/min. Con estos datos preliminares, se configuró el proceso GMAW mecanizado, en donde la trayectoria de la multicapa de cordón sencillo la generó el simulador en SprutCAM, mientras que de manera manual se abrió y cerró el arco eléctrico en la antorcha oprimiendo el gatillo de la antorcha.

La segunda aplicación se realizó de forma continua sin modificar los parámetros iniciales de prueba (velocidad de alimentación 8 m/min, tensión de salida 24 V, velocidad de avance 250 mm/min y caudal de gas 15 L/min.), únicamente se ajustó manualmente el eje Z del husillo del centro de mecanizado para modificar la altura de la pared al aplicar cada una de las capas. Como sustrato se empleó un acero al carbono ASTM A36 de espesor 6,5 mm y se aisló eléctricamente del CNC a través de un par de mordazas de poliamida. Al finalizar la aplicación de las once (11) capas se encontró que la poliamida no es el material adecuado porque la temperatura alcanzada en la aplicación completamente las mordazas, como se aprecia en la fig.2. La temperatura acumulada entre pases, además de deformar el sustrato, evitó una solidificación rápida del metal de soldadura en las capas más calientes y por tanto tendía a perder la forma del cordón de manera que la aplicación obtuvo una apariencia no uniforme, tal como lo muestra la figura 3.



Fig. 2. Resultado de la aplicación inicial de once (11) capas sencillas.



Fig. 3. Resultado de la aplicación inicial de once (11) capas sencillas.

Para automatizar el proceso, fue necesario sincronizar el movimiento del CNC con el inicio y fin de arco generado en la máquina de soldadura, para ello se realizó la conexión al CNC del gatillo de la antorcha y se creó el código para iniciar y finalizar el arco; este comando se incorporó al simulador generado por el software SprutCAM. Se probó la sincronización con depósitos de tres configuraciones geométricas diferentes Como se aprecia en la figura 4.



Fig. 4. Depósitos de pared sencilla como prueba de la conexión sincronizada entre CNC y máquina de soldadura.

También se retiró la mordaza de la mesa de trabajo del CNC, en su lugar se colocaron ladrillos refractarios para aislar térmica y eléctricamente el CNC del arco eléctrico. Para reducir la deformación del sustrato se cambió el espesor de 6,5 mm a uno de 20 mm y la temperatura entre capas se estableció que no sobrepasaría 150°C.

2) Exploración de intervalos para los parámetros de proceso

Se realizó un estudio exploratorio para encontrar los intervalos de parámetros de proceso, mediante la deposición de varios cordones en capa sencilla, como se aprecia en la figura 5. Los parámetros incluidos fueron la velocidad de alimentación, la velocidad de avance, la tensión y la corriente. Se inspeccionó visualmente la superficie de cada cordón buscando apariencia uniforme, ancho constante y de baja convexidad, esto con el fin de que cada capa previa sea lo más homogénea posible.

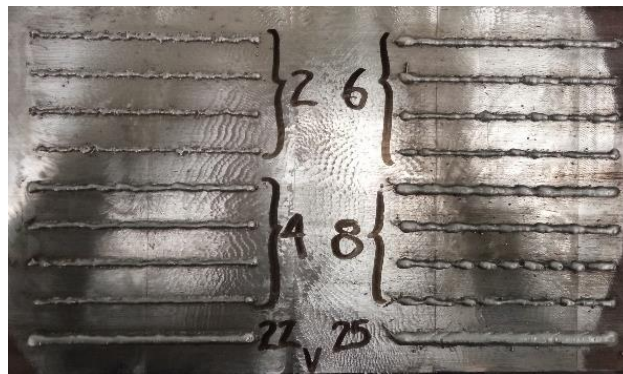


Fig. 5. Depósitos de prueba preliminar.

Se mantuvo constante la tensión de salida y se modificó la velocidad de alimentación del alambre y el avance de la antorcha, en diferentes configuraciones. Al final se obtuvo los siguientes parámetros, descritos en la tabla III, que permitieron obtener cordones de soldadura uniformes

TABLA III
PARÁMETROS OPERATIVOS APROBADOS EN INSPECCIÓN VISUAL

Velocidad de alimentación [m/min]	Velocidad de avance [mm/min]	Tensión [V]	Corriente [A]
5	200	24	80-93
5	450	24	74-90
6	200	25	83-100
6	450	25	90-107

Posteriormente se probó el traslape entre cordones de cada capa, con un desplazamiento entre ejes de cordones de 2,6 mm el resultado mostró que había una tendencia a generar un perfil irregular, como se presenta en la figura 6. Se probó un traslape de 5,1 mm obteniendo una mejora notable en la apariencia de la capa.



Fig. 6. Depósito para prueba de traslape entre cordones.

3) Fabricación de la pared y probetas a tracción

Para la deposición, se realizó en forma de una pared de longitud 220 mm, altura 115 mm y ancho 36 mm, utilizaron un caudal de CO₂ de 15 L/min, una distancia de la punta de contacto a la pieza de trabajo (CTWD) de 12 mm, velocidad de avance de 200 mm/min, tensión de salida de 24 V, velocidad de

alimentación de 5 m/min. La pared depositada se presenta en la fig. 7.



Fig. 7. Pared depositada para extraer probetas de tracción.

El precorte de las probetas de tracción, ver figura 8, se realizó con el equipo de oxcombustible para remover la pared del sustrato y con la segueta de vaivén se realizaron los cortes transversales y longitudinales a la dirección de aplicación para obtener las probetas en las dos direcciones que se denominan horizontal (paralelas a la dirección de avance) y vertical (transversal a la dirección de avance). Posteriormente se realizó el macroataque para detectar discontinuidades en la aplicación y el mecanizado de las probetas de tracción para su consecuente ensayo en la máquina universal.



Fig. 8. Precorte de la pared depositada para extraer probetas de tracción.

El mecanizado de las probetas de tracción se realizó de acuerdo con la figura 8 de la ASTM E8M-21: para las probetas horizontales se empleó la geometría de la probeta 2, mientras que las probetas verticales corresponden a la probeta 3. Se fabricaron dos probetas verticales y tres probetas horizontales utilizando un equipo Pinacho SE 200 x 750, como se aprecia en la fig. 9.



Fig. 9. Mecanizado de las probetas de tracción.

4) Ensayos a tracción

Los ensayos, cuyo montaje se presenta en la figura 10, se realizaron en la máquina universal de ensayos SHIMADZU UH-500kN a una temperatura ambiente de 21°C. A partir de las curvas de carga-desplazamiento, se obtuvo la resistencia a la fluencia, la resistencia a la tracción y el porcentaje de elongación, las cuales fueron comparadas contra los valores esperados según la AWS A5.18.

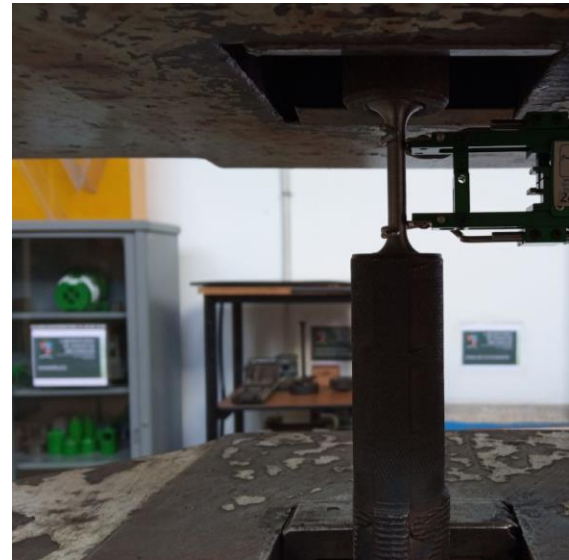


Fig. 10. Realización del ensayo de tracción.

III. RESULTADOS

En la tabla IV se presentan los resultados de las propiedades mecánicas obtenidas en cada probeta.

TABLA IV
PROPIEDADES MECÁNICAS OBTENIDAS

ID Probeta	Tipo de probeta	Resistencia a la fluencia al 0,2% [MPa]	Resistencia a la tracción [MPa]	Porcentaje de elongación [%]
1	Vertical	360	452	15
2	Vertical	417	464	17
4	Horizontal	408	512	33
5	Horizontal	408	508	27
6	Horizontal	390	493	32

La tabla V muestra los valores de media aritmética para cada propiedad y el correspondiente valor esperado de acuerdo con la especificación AWS A5.18.

TABLA V
MEDIA ARITMÉTICA DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS
OBTENIDAS

Dato	Resistencia a la fluencia al 0,2% [MPa]	Resistencia a la tracción [MPa]	Porcentaje de elongación [%]
Valor esperado	400	490	22
Probeta vertical	389	458	16
Probeta horizontal	402	504	31

A partir de la prueba realizada se determinó que es viable la generación de una pared metálica, a través de la deposición multicapa con GMAW convencional automatizado y que para mejorar el proceso fue importante el tiempo de espera entre capas lo que permitió que se regulara la temperatura y por tanto la solidificación hizo que la apariencia superficial del cordón y de la pared en general, fuera más uniforme. Como la trayectoria que inició siempre en el mismo punto hizo que el depósito tuviera una altura no homogénea, siendo mucho mayor en el punto de inicio de arco que en la zona de finalización, lo que se puede compensar haciendo una aplicación que invierta el sentido de inicio y finalización de cada capa.

Con el gas CO₂ la salpicadura fue excesiva, lo que va en detrimento de la eficiencia del proceso por las pérdidas tanto en salpicadura como en los humos generados, a su vez puede afectar otras partes del CNC que están siendo cubiertas por salpicadura, razón por la cual es importante cambiar el tipo de gas sencillo de 100% CO₂ por una mezcla habitual en la industria nacional y recomendada por los fabricantes de gases, normalmente se consiguen SG-AC-20 (80% Ar, 20% CO₂), SG-ACO-16/3 (81% Ar, 16% CO₂, 3% O), con ello se puede mejorar las características operativas (disminuir salpicadura, mayor eficiencia de deposición, mejorar la acción de mojado, estabilizar el arco) y evitar que se disminuyan las propiedades mecánicas.

El sustrato se deformó por la transferencia de calor ineficiente de la base de trabajo y al no estar anclado existió el riesgo de desplazamiento del punto de inicio que a pesar de corregirse visualmente no es lo suficientemente preciso, por ello es imperativo diseñar un sistema de anclaje que evite la deformación del sustrato, ya que esto también modifica el CTWD, aumentando la inestabilidad del arco e incide en la geometría de los cordones y los potenciales defectos.

El valor promedio obtenido de las propiedades mecánicas obtenidas se encuentra dentro de lo conseguido por otras investigaciones y que según R. Nunes [23] para las probetas en la dirección paralela a la dirección de deposición se obtuvo que la resistencia máxima a la tracción es de 472 ± 60 MPa, la resistencia a la fluencia 361 ± 79 MPa y el porcentaje de elongación 34 ± 8 %, ahora bien, para la dirección normal a la dirección de deposición los datos indican que la resistencia máxima a la tracción fue de 511 MPa, la resistencia a la fluencia 395 MPa y el porcentaje de elongación 21 %, con la salvedad de que es el único resultado que R. Nunes [23] presenta en su investigación. Los valores obtenidos por la experimentación de

R. Nunes [23] son superiores en cuanto a los datos anteriormente expuestos, pero es importante tener en cuenta que el tipo de transferencia es distinta a la probada en el desarrollo de la presente investigación (GMAW-S), este es un factor adicional a considerar en desarrollos futuros.

IV. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas convencionales de resistencia a la fluencia al 0,2%, resistencia a la tracción y el porcentaje de elongación, del metal de soldadura depositado con GMAW utilizando un alambre ER70S-6, se presentan las siguientes conclusiones:

- Las propiedades mecánicas en la dirección vertical son menores comparadas con la dirección horizontal. La resistencia a la fluencia al 0,2% es menor en un 3%, la resistencia máxima a la tracción en 9% y el porcentaje de elongación en 48%, siendo muy evidente la diferencia en la elongación.
- Las propiedades mecánicas obtenidas no superan en todos los casos los valores mínimos especificados para el metal de aporte ER70S-6, definido por la especificación AWS A5.18 y descrito en la tabla II, especialmente en las probetas verticales donde únicamente la resistencia a la fluencia de la probeta 2 es mayor al valor requerido, mientras que las demás propiedades son inferiores a lo especificado.
- En la dirección horizontal si es posible alcanzar los valores mínimos esperados de acuerdo con la especificación del metal de aporte, siendo el porcentaje de elongación la propiedad que exhibe un comportamiento destacable, mientras que la resistencia a la fluencia y a la tracción están muy cercanos al valor mínimo especificado.
- La media aritmética de las propiedades mecánicas de las probetas verticales no cumple el requisito especificado por AWS A5.18 mientras que en las probetas horizontales si cumplen el requerimiento normativo.
- A pesar de que en la especificación AWS A5.18, se indica que los ensayos se realizan en la dirección horizontal y no contempla la realización de pruebas transversales a la dirección de avance es la única especificación adecuada para comparar las propiedades obtenidas.
- Con este tipo de proceso de soldadura y alambre sólido utilizado en WAAM, es posible realizar partes metálicas de acero al carbono alcanzando las propiedades mecánicas requeridas por la especificación para el metal de aporte, realizando una mayor cantidad de pruebas en diferentes rangos de las variables del proceso a partir de los equipos disponibles e implementando una metodología de aseguramiento de la calidad.

En trabajos posteriores es importante incrementar la cantidad de réplicas a partir de estos datos obtenidos y con la nueva información que surgen de investigaciones paralelas, teniendo en consideración entre otros aspectos, los siguientes: que la

máquina de soldadura permita o no, modificar el tipo de transferencia y para ello incluir también las variables necesarias como el tipo de gas y parámetros eléctricos, adicionar alguna inspección no destructiva para detectar discontinuidades y alinear los resultados con la normatividad que esté vigente, incluir algún modelado del mecanismo de transferencia de calor que permita mejorar el proceso o que intente predecir las deformaciones que repercutirán en los esfuerzos residuales y finalmente incluir otras propiedades como la tenacidad a la entalla y microdureza.

REFERENCIAS

- [1] T. Duda and L. V. Raghavan, "3D Metal Printing Technology," in *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier B.V., 2016, pp. 103–110. doi: 10.1016/j.ifacol.2016.11.111.
- [2] *ISO/ASTM 52900:2021(E). Standard Terminology for Additive Manufacturing - General Principles - Terminology*. [En línea]. Disponible: <https://www.iso.org/standard/74514.html>.
- [3] K. S. Derekar, "A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium," May 24, 2018, *Taylor and Francis Ltd*. doi: 10.1080/02670836.2018.1455012.
- [4] S. Moylan, J. Slotwinski, A. Cooke, K. Jurens, and M. A. Donmez, "Lessons learned in establishing the NIST metal additive manufacturing laboratory," Gaithersburg, MD, Jun. 2013. doi: 10.6028/NIST.TN.1801.
- [5] R. Ponche, O. Kerbrat, P. Mognol, and J. Y. Hascoet, "A novel methodology of design for Additive Manufacturing applied to Additive Laser Manufacturing process," *Robot Comput Integr Manuf*, vol. 30, no. 4, pp. 389–398, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.rcim.2013.12.001.
- [6] C. Buchanan and L. Gardner, "Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges," Feb. 01, 2019, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.11.045.
- [7] J. L. Prado-Cerqueira, J. L. Diéguez, and A. M. Camacho, "Preliminary development of a Wire and Arc Additive Manufacturing system (WAAM)," *Procedia Manuf*, vol. 13, pp. 895–902, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.154.
- [8] B. Wu *et al.*, "A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement," Oct. 01, 2018, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001.
- [9] R. Baker, "Method of Making Decorative Articles," 1,533,300, Apr. 14, 1920. [En línea] Disponible: <https://patents.google.com/patent/US1533300A/en>
- [10] A. Ujiie, "Method of and Apparatus for Constructings Substantially Circular Cross Section Vessel by Welding," 3,558,846. [En línea] Disponible: <https://patents.google.com/patent/US3558846A/en>
- [11] Z. Lin, K. Song, and X. Yu, "A review on wire and arc additive manufacturing of titanium alloy," Oct. 01, 2021, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.jmapro.2021.08.018.
- [12] A. Shah, R. Aliyev, H. Zeidler, and S. Krinke, "A Review of the Recent Developments and Challenges in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process," Jun. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/jmmp7030097.
- [13] S. Srivatsav, V. Jayakumar, and M. Sathishkumar, "Recent developments and challenges associated with wire arc additive manufacturing of Al alloy: A review," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2021, pp. 8561–8566. doi: 10.1016/j.matpr.2021.03.542.
- [14] A. Ermakova, A. Mehmanparast, S. Ganguly, N. Razavi, and F. Berto, "Investigation of mechanical and fracture properties of wire and arc additively manufactured low carbon steel components," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 109, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.tafmec.2020.102685.
- [15] C. V. Haden, G. Zeng, F. M. Carter, C. Ruhl, B. A. Krick, and D. G. Harlow, "Wire and arc additive manufactured steel: Tensile and wear properties," *Addit Manuf*, vol. 16, pp. 115–123, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.addma.2017.05.010.
- [16] A. E. Fragoso Poblano, "Desarrollo de un proceso de manufactura aditiva 3D para aplicación de metales". Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 2018. [En línea] Disponible: <https://repositorio.unam.mx/contenidos/336641>.
- [17] J. C. Javier Cervantes *et al.*, "Desarrollo de un proceso de manufactura aditiva (AM) de metal y determinación de propiedades de las piezas obtenidas," En: *Memorias del XXIV Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, 19 al 20 de septiembre de 2018. ISSN 2448-5551.
- [18] V. T. Bustamante y A. I. Jaramillo López, "Cierre de brechas de innovación y tecnología," Medellín, Colombia, 2018. [En línea] Disponible: <https://www.andi.com.co/uploads/estudio%20cierre%20de%20brechas%20innovacion%20y%20tecnologia-ilovepdf-compressed.pdf>
- [19] American Welding Society, *Welding Handbook, Welding Processes Part 1*, 9th ed., vol. 2. Miami, 2004.
- [20] Y. C. Poveda Castillo, "Desarrollo de un simulador de manufactura aditiva por soldadura por arco (WAAM) para el centro de mecanizado Leadwell V20i de la Fundación Universitaria Los Libertadores." Fundación Universitaria Los Libertadores, 2022. [En línea] Disponible: <http://hdl.handle.net/11371/5168>.
- [21] American Welding Society, *AWS A5.18/A5.18M:2021 Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding*, 8th ed. Miami, 2021.
- [22] American Welding Society, *AWS A5.32M/A5.32:2021 Welding Consumables - Gases and Gas Mixtures for Fusion Welding and Allied Processes*, 3rd ed. Miami, 2021.
- [23] R. Nunes, *et al* "A benchmark of mechanical properties and operational parameters of different steel filler metals for wire arc additive manufacturing" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, May. 12, 2023. doi.org/10.1007/s00170-023-11520-z.

Elmer Cepeda Gómez es ingeniero mecánico de la Universidad Nacional de Colombia y Especialista en Soldadura de la Universidad Libre. Cuenta con experiencia industrial en procesos de unión y corte de metales. Ha sido becario como docente auxiliar en la Universidad Nacional de Colombia, actualmente es profesor de tiempo completo en el departamento de Mecatrónica de la Universidad de San Buenaventura en Bogotá D.C., y se encuentra trabajando en la tesis “Desarrollo de un proceso de manufactura aditiva con arco eléctrico y alambre para soldar (WAAM) empleando acero al carbono ER70S-6” para optar al título de Magister en Materiales en la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. <https://orcid.org/0009-0007-9038-2215>

Yeimy Caterine Poveda Castillo es ingeniera mecánica con magister en Ingeniería de la Fundación Universitaria Los Libertadores. Realizó el trabajo de grado “Desarrollo de un simulador de manufactura aditiva por soldadura por arco (WAAM) para el centro de mecanizado Leadwell V20i de la Fundación Universitaria Los Libertadores”. Actualmente es profesora asistente del programa de Ingeniería Mecánica de la Fundación Universitaria Los Libertadores. <https://orcid.org/0000-0002-0992-1418>

Ubaldo García Zaragoza es ingeniero mecánico de la Universidad Santo Tomás con maestría en ingeniería mecánica de la Universidad Nacional de Colombia. Actualmente es profesor de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad ECCI y su línea de investigación es la Manufactura Aditiva mediante soldadura por Arco Eléctrico WAAM, empleando un enfoque integral que abarca desde la simulación del proceso tanto en CNC como en robots industriales hasta el control de calidad de componentes fabricados con dicha tecnología. <https://orcid.org/0000-0003-0144-6920>

Carlos A. Narváez-Tovar es ingeniero mecánico, magister en ingeniería - materiales y procesos, y doctor en ingeniería - ciencia y tecnología de materiales de la Universidad Nacional de Colombia. Cuenta con la certificación profesional Certified Additive Manufacturing Fundamentals (CAMF) otorgada por la Society of Manufacturing Engineers (SME) desde julio de 2024. Actualmente es profesor asociado del Departamento de Ingeniería Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá. Su línea de investigación actual es el Diseño para Manufactura Aditiva, dirigiendo proyectos y tesis para procesos aditivos con polímeros (FDM, DLP, SLS) y metales (WAAM, SLM). <https://orcid.org/0000-0001-6102-9841>