

**UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA METALURGICA
Y DE MATERIALES**



**UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA**

**Implementación de la manufactura aditiva basada en soldadura por
arco metálico protegido por gas de piezas de acero inoxidable
austenítico**

**Memoria de titulación para optar al título de Ingeniero Civil
Metalúrgico**

Profesora Guía: Karem Tello Araya

**Felipe Ignacio Sandoval Orellana
2024**

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que me han apoyado durante la realización de esta memoria.

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi profesora guía, la profesora Karem Tello Araya por su orientación, consejos y apoyo a lo largo de todo el proceso. Su dedicación y compromiso fueron fundamentales para la culminación exitosa de este trabajo.

También quiero agradecer a los miembros de la comisión de evaluación de esta memoria, Felipe Castro y Sergio Ríos por sus valiosos comentarios y sugerencias que ayudaron a mejorar significativamente este trabajo.

Agradezco al Laboratorio de Procesamiento de Materiales, al Laboratorio de Análisis de Materiales y Microscopía, al Laboratorio de Ensayos de Materiales y al Centro Integrado de Manufactura y Automatización de la UTFSM, donde se llevaron a cabo las investigaciones, por proporcionarme las herramientas y el entorno necesario para desarrollar mi trabajo.

Merece también una mención especial por su constante apoyo y asesoría a los apoyos académicos Felipe Soto y Mauricio Solís de la UTFSM, que fueron fundamentales en el desarrollo de la parte experimental de este trabajo.

Quiero agradecer también a mi familia, especialmente a mis padres por su amor y apoyo incondicional, y por creer en mí en todo momento.

Finalmente, agradezco a mis amigos de la pensión, mis compañeros de carrera y mis amigos de Temuco, por su compañía y apañe durante varias etapas de este proceso.

A todos ustedes, muchas gracias.

RESUMEN

El proceso de manufactura aditiva basada en soldadura por arco metálico protegido por gas (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM), presenta un gran potencial como una alternativa para las fundiciones por la rapidez con la que es posible fabricar una pieza compleja sin muchas restricciones en cuanto a su tamaño. Este proceso aún está en etapa de implementación en la industria, y carece de normas estandarizadas para su ejecución. Actualmente, en la industria existen ejemplos de aplicación de esta tecnología, pero limitado a estudios de caso, razón por la cual una implementación para un material y geometría específicos es un buen punto de partida para investigaciones de este tema en la universidad.

El objetivo de este trabajo es implementar un sistema WAAM a nivel de laboratorio y analizar el efecto del aporte calórico en la evolución microestructural y las propiedades mecánicas de piezas “as-welded” fabricadas mediante este método.

Se logró la implementación del WAAM para piezas de acero inoxidable austenítico en el Centro Integrado de Manufactura y Automatización (CIMA). El sistema utiliza un equipo de soldadura MIG/GMAW acoplado a un robot industrial KUKA con su respectiva unidad de control. En la investigación, se fabricaron y analizaron tres placas de acero inoxidable AISI 308L con diferentes niveles de calor de aporte: alto (349 J/mm), medio (300 J/mm) y bajo (288 J/mm), que luego se evaluaron en base a ensayos de tracción, mediciones de dureza y metalografía. El proceso de fabricación requirió ajustes manuales para controlar la temperatura y corregir irregularidades en los cordones, parámetros cuyo control podría ser automatizado en un futuro.

Los resultados mostraron que al disminuir el calor de aporte, la dureza de las placas aumentó, alcanzando valores comparables e incluso mayores a los esperados para la aleación en estado as welded. Las propiedades mecánicas (YS, UTS y %el) también variaron según el nivel de calor de aporte, siendo más favorables con un bajo calor de aporte debido a una estructura más fina y homogénea, como se observó mediante análisis metalográfico. La microestructura reveló ferrita en forma de las morfologías “lacy” y “vermicular” en todas las piezas, con un aumento en la presencia de ferrita lacy para menor aporte calórico.

En conclusión, la implementación del método WAAM fue exitosa, pero se identificaron áreas de mejora, especialmente en la potencial automatización y la optimización de parámetros de

fabricación. Las propiedades mecánicas logradas fueron adecuadas y comparables con métodos tradicionales de manufactura, destacando el potencial del WAAM como una alternativa en la producción de componentes metálicos.

ABSTRACT

The Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) process holds significant potential as an alternative to traditional casting due to its ability to rapidly produce complex parts with few size restrictions. This manufacturing method is still in the industry implementation stage and lacks standardized norms for execution. Currently, industry applications of this technology are limited to case studies, making the system's setup for a specific material and geometry a strong starting point for university research.

This work aims to implement a WAAM system at the laboratory level and analyze the effect of heat input on the microstructural evolution and mechanical properties of as-welded parts produced using this method. WAAM implementation was achieved for austenitic stainless steel parts at the Integrated Manufacturing and Automation Center (CIMA). The system integrates a MIG/GMAW welding unit with a KUKA industrial robot and its corresponding control unit. During the research, three plates made of AISI 308L stainless steel were manufactured and analyzed with varying heat input levels: high (349 J/mm), medium (300 J/mm), and low (288 J/mm), followed by evaluation through tensile testing, hardness measurements, and metallography. The manufacturing process required manual adjustments to control temperature and correct irregularities in the weld beads, parameters whose control could be automated.

Results showed that reducing heat input increased plate hardness, reaching values comparable to or greater than those expected for the as-welded alloy. Mechanical properties (yield strength, ultimate tensile strength, and elongation) also varied based on heat input, with more favorable outcomes observed at lower heat input due to a finer and more homogeneous structure, as evidenced by metallographic analysis. All parts exhibited "lacy" and "vermicular" as ferrite morphologies in their microstructure, with increased lacy ferrite at lower heat inputs.

Overall, WAAM implementation was successful, yet areas for improvement were identified, particularly in potential automation and manufacturing parameter optimization. The achieved mechanical properties were adequate and comparable to traditional manufacturing methods, highlighting WAAM's potential as an alternative for metal component production.

TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	v
TABLA DE CONTENIDOS	vi
ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS	1
1.1. Introducción	1
1.2. El proceso WAAM.....	2
1.3. El calor de aporte.....	4
1.4. El material de aporte.....	5
1.5. La microestructura y las propiedades mecánicas.....	6
1.6. Objetivos	11
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	12
2.1 Implementación del Proceso WAAM.....	12
2.2 Pruebas Preliminares	14
2.3 Fabricación de placas.....	18
2.4 Análisis	19
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	22
3.2 Dureza.....	23
3.3 Ensayos de tracción	25
3.4 Caracterización Metalográfica.....	26
3.5 Discusión y Recomendaciones	32
CONCLUSIONES.....	35
REFERENCIAS.....	37
ANEXO 1: Programa utilizado en el Robot KUKA para la fabricación de placas con WAAM39	

ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

1.1. Introducción

La tecnología WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) es un proceso de fabricación aditiva que combina material metálico en forma de hilo o alambre con técnicas de soldadura al arco para fundirlo, depositarlo y generar así las capas que conformarán la geometría de la pieza final.

Esta tecnología relativamente nueva se ha implementado para aceros, aceros inoxidable, aleaciones de Níquel, Invar y aleaciones Ni-Al-Cu [1]. Donde sus aplicaciones se centran en la fabricación de piezas complejas, típicamente fabricadas por fundición, donde tienen una ventaja importante en tiempo y facilidad de fabricación, ya que, a diferencia de las piezas fundidas, no requiere modelo ni molde, y no está limitado por el tamaño de pieza. Debido a que actualmente no existen normas ni guías para este proceso, la principal limitante para el uso de WAAM en la industria es contar con personal capacitado para realizarlo y producir una pieza funcional, es por eso que las pocas aplicaciones que se han visto en la industria son por empresas dedicadas a soldadura como Lincoln Electric [2], que cuentan con este personal capacitado para diseñar un proceso apto para cada caso.

La investigación actualmente se centra en definir parámetros óptimos de operación, obtener propiedades mecánicas confiables para sus aplicaciones y comprender la formación de microestructuras para los distintos materiales aplicados con el método WAAM.

Este trabajo tuvo como objetivo analizar el efecto del aporte calórico (HI) en la evolución microestructural de piezas as-manufactured; el efecto del HI en las propiedades mecánicas medidas a través del ensayo de tracción y ensayos de dureza y, finalmente, establecer una comparación entre las propiedades mecánicas de las probetas obtenidas con WAAM con los valores esperados para la aleación. Para lograrlo, se implementó el sistema WAAM para la fabricación de piezas de acero inoxidable austenítico a través de un trabajo colaborativo entre el Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales (DIMM) y el Centro Integrado de Manufactura Avanzada (CIMA), ambos de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM).

Se fabricaron 3 placas de acero inoxidable austenítico mediante WAAM, donde cada placa se fabricó con distintos parámetros, variando el HI con pruebas a 288, 300 y 349 J/mm. A partir de cada placa se fabricaron probetas de tracción extraídas de diferentes zonas de la placa, lo cual permitió analizar la anisotropía en las propiedades obtenidas. Asimismo se obtienen probetas para macrodureza y para análisis metalográfico para así poder explicar las tendencias observadas en las propiedades. Finalmente, se realizó una comparación con estudios similares en la bibliografía y con los valores estándar por norma AWS que una sección soldada de este material debería poseer, para así concluir respecto a la aplicabilidad de esta técnica en la industria.

1.2. El proceso WAAM

El proceso de WAAM es relativamente nuevo, pero está desarrollándose rápidamente [3]. Si bien el uso de técnicas de soldadura por arco para prototipado se comenzó a realizar desde principios de los 2000, máquinas especializadas en WAAM empiezan a aparecer en la industria alrededor del año 2015, estableciéndose como una técnica novedosa que aún está en etapa de desarrollo, pero con gran potencial en la industria, ya que desde entonces la cantidad de publicaciones referidas al tema ha aumentado rápidamente. La Figura 1, ilustra la evolución de la investigación dedicada a WAAM en el período 2015-2024 [4], la cual revela que en el año 2023 se registraron 578 artículos científicos asociados a WAAM y se espera que la tendencia se mantenga en los próximos años.

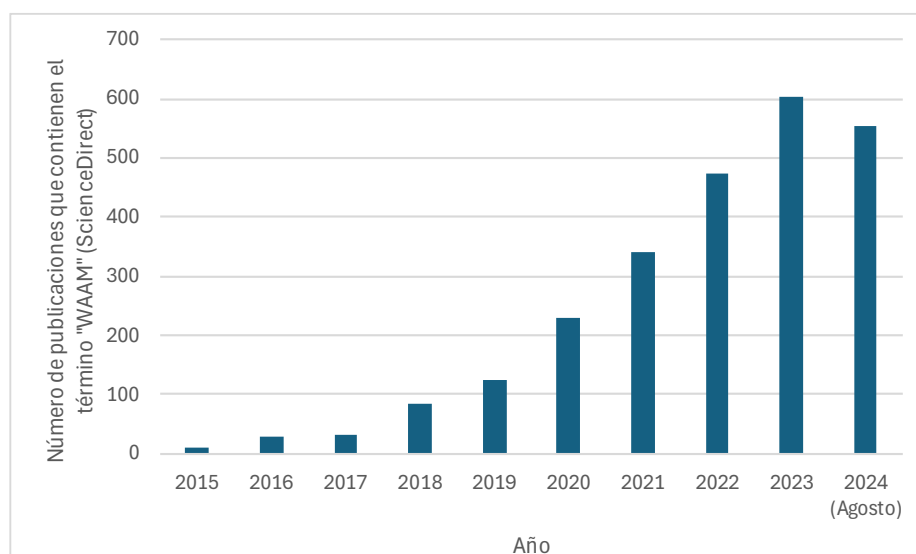


Figura 1 Número de artículos que contienen el término WAAM hasta la fecha (fuente: Scien ceDirect) [4]

La razón de esto es el creciente interés de la industria en el potencial de la manufactura aditiva (AM) para reemplazar productos fundidos en aplicaciones específicas. Por ejemplo, en la producción de codos, tuberías o válvulas de gran tamaño, que son complejas de fabricar debido a su alto volumen y masa, o en piezas complejas como bloques de motor, impulsores de bombas, carcasas y hélices de turbinas, que actualmente solo se fabrican mediante fundición.

La principal ventaja de la AM es su velocidad, lo que la hace ideal para el prototipado, ya que en principio sólo requiere un modelo CAD y un rebanado (conocido como “slicing” en la impresión 3D) para definir la geometría de la pieza. En contraste, los productos fundidos necesitan el diseño y la fabricación de modelos y moldes, además de enfrentar restricciones de tamaño relacionadas con la capacidad del horno de fusión.

Esto es de interés para las grandes industrias, ya que las pérdidas por detener el proceso productivo debido a la falta de repuestos son significativas. Alternativas como la AM permiten obtener piezas rápidamente, lo cual es esencial cuando el suministro de repuestos es limitado o deben importarse del extranjero.

Actualmente, ya existen ejemplos de esta aplicación en los EE.UU. Por ejemplo, Lincoln Electric, en 2022, fabricó repuestos para una refinería petrolera y una pala mezcladora para mezcla de flux para su propio uso en la producción de flux. [5] [2].

Sin embargo, aún no existe el conocimiento necesario para su aplicación masiva, esto se debe a que en la actualidad no hay normas o guías que permitan fabricar una pieza con WAAM de manera estandarizada. Siendo su uso restringido a un estudio caso a caso que sólo es manejable por expertos en el área de la soldadura, que pueden asegurar la funcionalidad de la pieza fabricada, dado que la microestructura que se genera tiene una gran similitud con la zona afectada térmicamente (ZAT) de una soldadura [3]. La investigación en la actualidad se centra en definir parámetros de operación óptimos, comprender la formación de microestructuras con WAAM para diferentes aleaciones y encontrar la manera de obtener propiedades confiables para su aplicación.

1.3. El calor de aporte

El método WAAM es una técnica de manufactura aditiva que deriva de la familia de los métodos DED (Direct Energy Deposition), que son métodos basados en fusión de material a la vez que estos son depositados, a diferencia de otras técnicas que funden material ya depositado en un lecho de polvos u otros métodos. La principal ventaja de los métodos DED radica en la alta productividad que pueden alcanzar, mayores grados de libertad y menos restricciones de tamaño que otros métodos de manufactura aditiva que están limitados a una cámara, como Sinterización Selectiva por Láser de Metal (DMLS), Fusión Selectiva por Láser (SLM) o Fusión por Haz de Electrones (EBM).

La característica que diferencia el WAAM de otros métodos DED es la fuente de energía, que en este caso es el arco eléctrico. El uso de un arco eléctrico es una opción sumamente práctica por su alta eficiencia y su relativamente bajo costo de equipamiento [6] (ver Figura 2), esto nos lleva a considerar la importancia del aporte calórico, este método es intrínsecamente un método de alto aporte calórico, lo cual puede resultar en dificultades para controlar la geometría y en la elección del sustrato, ya que puede provocar distorsión en estos y debe tomarse en cuenta al momento de diseñar un procedimiento de fabricación.

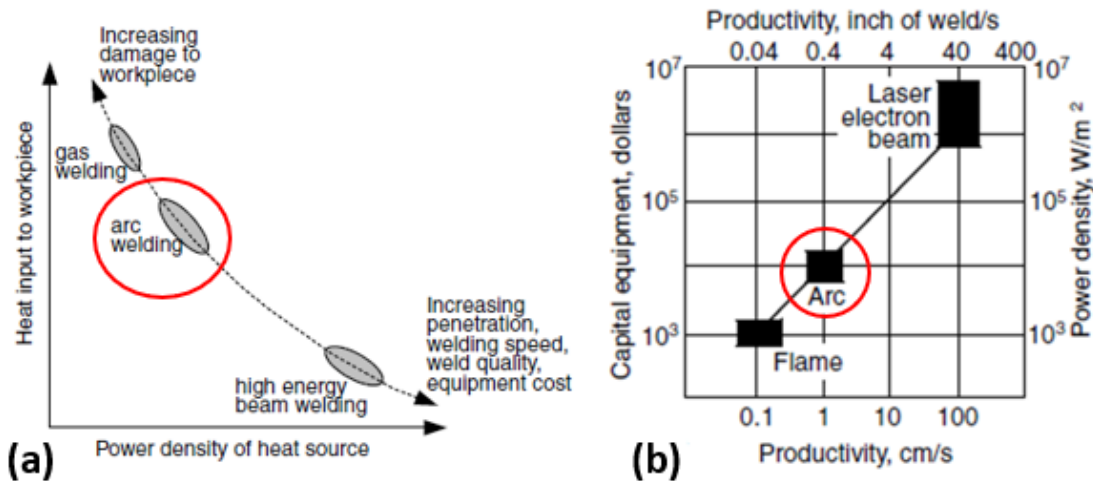


Figura 2 (a) Variación de la densidad de potencia de la fuente de calor respecto al aporte calórico a la pieza. (b) Comparación de procesos de soldadura en cuanto a costo del equipamiento, densidad de potencia y productividad [6]

El aporte calórico al igual que en la soldadura, se define por la ecuación (1) [7]:

$$HI = \eta \frac{VI}{v} \quad (1)$$

Donde HI corresponde al calor de aporte (J/mm), η corresponde a la eficiencia térmica, V corresponde al voltaje (V), I corresponde a la corriente (A), y v corresponde a la velocidad de avance de la torcha (mm/min).

El valor de eficiencia η para GMAW suele ser de alrededor de 80%-90%, es decir, es un método de alta eficiencia, lo cual resulta en una alta transferencia de calor al material base o sustrato, aunque el nivel de aporte calórico puede controlarse modificando principalmente los parámetros de voltaje del arco y velocidad de pasada.

La elección de un aporte calórico adecuado para la fabricación WAAM es un foco de investigación, ya que no existen normas que definan parámetros ideales, y dependiendo del material utilizado y la geometría a fabricar existirán consideraciones a la hora de elegir los parámetros de velocidad de avance de la torcha, voltaje y corriente, dado que pueden comprometer la integridad de la geometría o afectar las propiedades resultantes de la pieza fabricada.

1.4. El material de aporte

Los materiales usados para WAAM deben tener baja tendencia al agrietamiento en caliente, se encuentran entre estos algunos aceros, aceros inoxidable, Invar®, aleaciones de Titanio y aleaciones de Níquel. Para esta investigación, el material elegido para los experimentos es un acero inoxidable austenítico (AISI 308L) que es un material común, de fácil obtención, con variadas aplicaciones y una baja probabilidad de agrietamiento dada su composición química [8] (ver Tabla 1). De acuerdo al diagrama de Schaeffler [6] mostrado en la Figura 3 y los valores de Cr equivalente y Ni equivalente de la aleación (20,6 y 11,4 respectivamente), el acero AISI 308L no forma martensita y tiene una secuencia de solidificación FA, es decir de $L \rightarrow L + \delta \rightarrow \delta + \gamma$ [9], lo cual indica su resistencia al agrietamiento en caliente. La susceptibilidad de agrietamiento en caliente en inoxidables austeníticos se produce por la presencia de impurezas principalmente de azufre y fósforo, que genera fases frágiles y duras de bajo punto de fusión en las regiones interdendríticas.

En el caso que la austenita solidificara primero que la ferrita, los átomos de S y P son rechazados por la austenita hacia el líquido y, en la etapa terminal de la solidificación enriquecen el líquido en estas impurezas favoreciendo la aparición de fases de baja temperatura de fusión resultando en un aumento del rango de solidificación. Este aumento del rango de solidificación es uno de los factores metalúrgicos que contribuyen al agrietamiento en caliente, sin embargo este no es el caso del 308L.

Tabla 1 Composición química del metal depositado [8]

Composición química típica del metal depositado (wt%)								
Nombre	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
ER 308-L 1,2mm INDURA	0,02	1,9	0,38	0,02	0,01	19,8	9,8	0,19

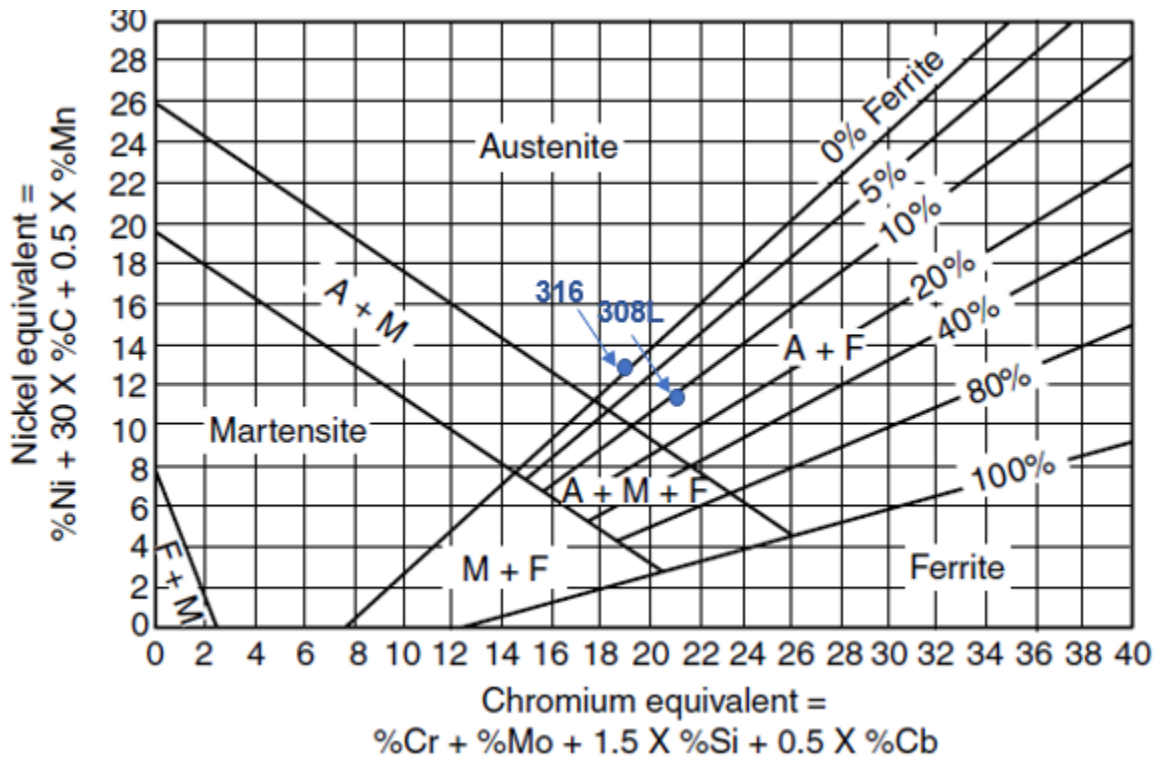


Figura 3 Ubicación de los aceros 316 y 308L en el Diagrama de Schaeffler [6]

1.5. La microestructura y las propiedades mecánicas

En la Figura 3 se observan las fases de equilibrio que deberían estar presentes en esta aleación, alrededor de un 10% de ferrita delta (δ) en una matriz austenítica (γ), esto se obtiene solidificando en el orden $L \rightarrow L + \delta \rightarrow \delta + \gamma$, donde nuclea primero la ferrita primaria

y, luego, ocurre la transformación peritética entre el líquido remanente y la fase ferrita-delta primaria, esta transformación es incompleta, quedando una ferrita delta residual.

También resulta relevante observar que la ferrita δ posee diversas morfologías que pueden influir en las propiedades mecánicas del producto final. En la Figura 4 se muestran las principales morfologías que se pueden encontrar en una soldadura de este material, denominadas “vermicular” y “lacy”, 2 de las 4 morfologías descritas por David [10], que trabajó con AISI 308 ($Cr_{eq}/Ni_{eq}=1,66$) donde se explica que estas morfologías se generan dependiendo de los valores de Cr_{eq}/Ni_{eq} y las condiciones de enfriamiento, donde las otras morfologías son menos comunes y se dan en casos específicos, como la “acicular” y “globular”, más comunes en aleaciones con $Cr_{eq}/Ni_{eq} > 2$, pero pueden aparecer en zonas acotadas debido a macrosegregación y la presencia de ciclos térmicos. Este estudio encontró que estas dos primeras morfologías se encuentran en una soldadura con acero inoxidable 308 en distintos cordones, por lo que en una fabricación del tipo WAAM también deberíamos esperar que ambas estructuras se encuentren presentes en distintas zonas de la pieza.

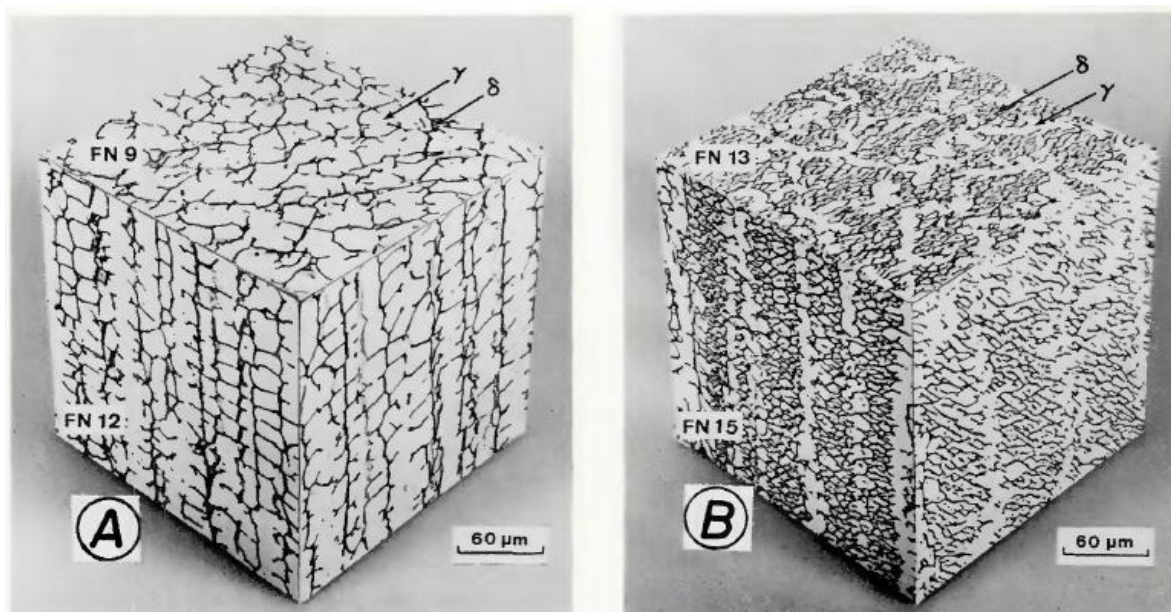


Figura 4 Metalografías compuestas 3D de las morfologías en una soldadura multipasada de acero inoxidable AISI 308. (A: Vermicular y B: Lacy) [10]

Un estudio más reciente de H. Inoue y T. Koseki [11] investigaron con más detalle los mecanismos de solidificación específicamente de estas dos morfologías en un acero inoxidable austenítico AISI 304 en un proceso de soldadura GTAW autógeno. Según los

investigadores, la ferrita δ que nuclea y crece a partir de los granos previos de austenita epitaxial puede crecer con una u otra morfología dependiendo de la alineación del grano austenítico con el flujo de calor y si se da la relación de orientación Kurdjumov-Sachs (K-S), tal como se ilustra en la Figura 5. Si bien la probabilidad de que se dé la relación K-S no es directamente controlable en el proceso, dado que el crecimiento de ferrita sigue la dirección del flujo de calor, una fuente de calor móvil como la que se tiene en el método WAAM sin duda afectará el crecimiento de la ferrita, y posiblemente el aporte calórico y especialmente la velocidad de pasada de la torcha influirá en la morfología resultante en la pieza fabricada.

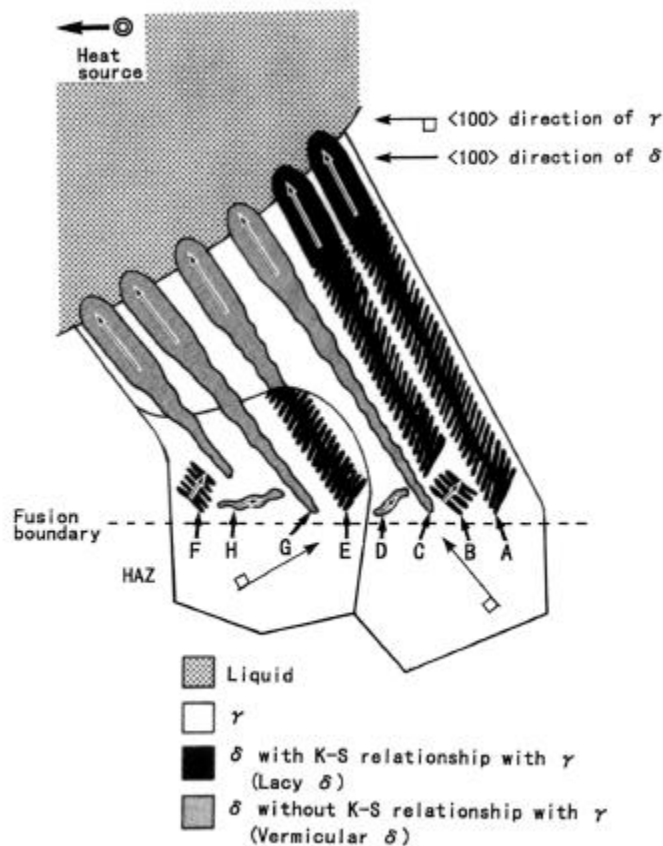


Figura 5 Esquema del proceso y mecanismo de formación de diferentes morfologías de ferrita en soldaduras con solidificación de tipo $\delta \rightarrow \delta + \gamma$ [11]

La anisotropía en piezas fabricadas por WAAM es una característica importante de analizar, ya que se fabrica mediante la superposición de cordones de soldadura, se generan áreas de superposición (Overlapping Area, OA) y re-fusión (Remelting Area, RA) por sus siglas en inglés) [12]. Estas zonas ilustradas en la Figura 6, describen regiones en donde dos cordones se superponen al depositarse uno al lado del otro (OA) y las zonas donde al

depositar un nuevo cordón sobre uno previamente depositado, parte de este vuelve a fundirse (RA).

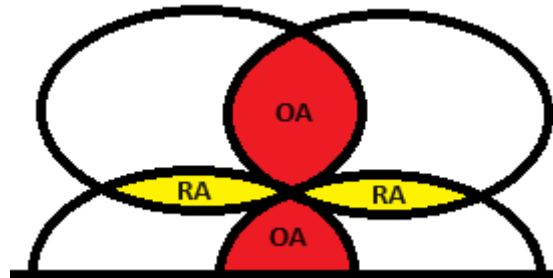


Figura 6 Esquema Ilustrativo: Overlapping Area (OA) y Remelting Area (RA) en cordones de soldadura

La Figura 7 muestra como estas zonas se alternan en la dirección transversal, lo cual provoca una variación importante de microestructura y propiedades a lo largo de la pieza, generando propiedades con dependencia de la posición y orientación.

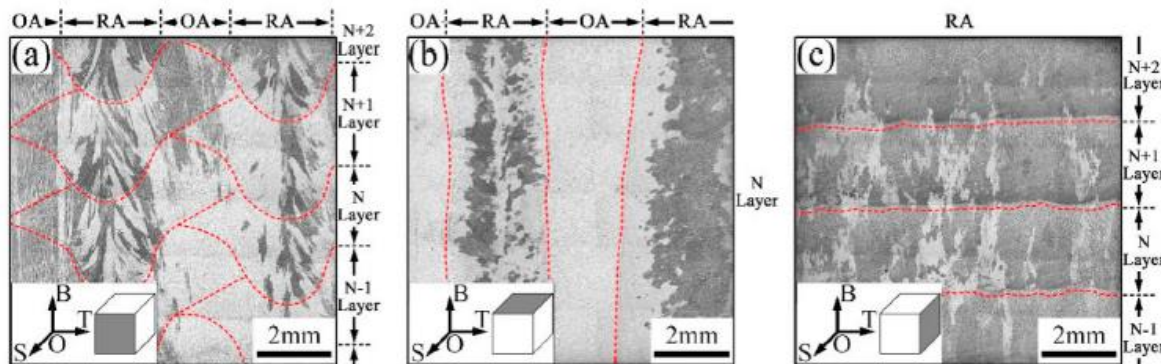


Figura 7 Macroestructura de una pieza "as-built" de 316L en los planos (a) BOT, (b) SOT y (c) BOS [12]

Como consecuencia, se genera una diferencia de propiedades, donde Wang y colaboradores [12] encontraron que la RA tiende a presentar mejores propiedades mecánicas (YS, UTS, %EL y dureza) debido a la existencia de mayor gradiente de temperatura y, como consecuencia, un enfriamiento más rápido, generándose granos columnares más finos; en contraste a la OA que presentaba granos direccionados de gran tamaño, por esta misma razón, también se encuentra mayor dureza en las esquinas de la pieza que en la sección media de esta, tal como se observa en la Figura 8.

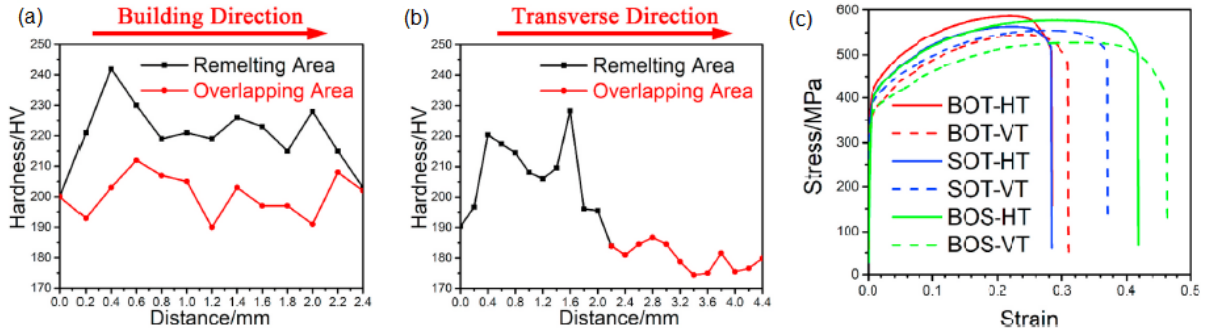


Figura 8 Propiedades obtenidas (a) microdureza en la dirección de pasada (b) microdureza en la dirección transversal (c) Curvas de esfuerzo-deformación de probetas verticales (VT) y horizontales (HT) para los planos BOT, SOT y BOS [12]

Las investigaciones han reportado que a menor aporte calórico mejora la precisión de la geometría, ya que a una menor velocidad de deposición y/o menor temperatura máxima disminuye la distorsión del cordón una vez depositado [3]. Además el HI afecta la morfología de los granos, donde un bajo HI está relacionado también a menor tamaño de grano al existir un enfriamiento más rápido, lo cual tiene un efecto positivo en las propiedades mecánicas.

Sin embargo, también se pueden encontrar argumentos para el uso de un alto HI, Cunningham *et al.* [13] observaron que un alto HI está directamente relacionado con un mayor módulo de Young mientras mantiene propiedades mecánicas similares a su contraparte de bajo HI [10] (ver Tabla 2), que puede ser útil para aplicaciones que requieran mayor rigidez.

A pesar de que se pueden observar ciertas tendencias, es difícil concluir sobre estas, y el consenso general es que hace falta más investigación, ya que los distintos experimentos realizados por diferentes autores varían en otros parámetros como el material, geometría, temperatura de interfase, tiempo de interfase, tratamientos térmicos posteriores y otros. Lo cual dificulta la comparación directa de los resultados.

Tabla 2 Módulo de Young, Esfuerzo de fluencia, resistencia máxima a la tracción y elongación para ensayos de baja y alta temperatura de interfase (LIT y HIT) y bajo y alto aporte calórico (LHI y HHI) [13]

Experimento	Probeta	n	Módulo de Young (GPa)	Esfuerzo de Fluencia (MPa)	UTS (MPa)	Elongación (%)
LIT-HHI	Promedio	6	179,2±42,7	320,2±26,9	570,9±22,1	42,1%±2,3
	Horizontal	3	192,0±50,6	330,7±34,4	582,2±21,4	42,0%±2,9
	Vertical	3	166,5±38,9	309,8±17,08	559,6±19,5	42,2%±2,2
LIT-LHI	Promedio	6	121,2±16,3	308,1±16,6	561,2±32,6	41,4%±8,6
	Horizontal	3	130,1±19,1	313,8±14,8	549,4±34,5	47,3%±8,6
	Vertical	3	112,2±7,7	302,4±19,2	572,9±32,5	35,5%±2,9
HIT-HHI	Promedio	6	165,4±42,0	302,6±25,0	579,0±29,9	44,1%±5,2
	Horizontal	3	162,6±50,1	302,0±11,4	576,7±10,2	47,0%±5,9
	Vertical	3	168,2±43,4	303,1±37,9	581,4±46,0	41,3%±3,0
HIT-LHI	Promedio	6	141,3±26,9	298,8±5,5	565,2±9,43	43,0%±4,8
	Horizontal	3	134,0±20,3	300,1±5,4	551,9±10,2	44,4%±5,5
	Vertical	3	148,6±35,1	297,5±6,8	578,4±26,5	40,9%±4,1

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Evaluar a nivel de laboratorio, la manufactura aditiva de acero inoxidable austenítico utilizando el proceso de manufactura aditiva mediante arco eléctrico (WAAM).

1.6.2. Objetivos Específicos

1. Implementar el proceso WAAM a nivel de laboratorio.
2. Analizar el efecto del aporte calórico en la evolución microestructural de piezas “as-welded” fabricadas mediante manufactura aditiva.
3. Analizar el efecto de aporte calórico en las propiedades mecánicas en tracción y de dureza de piezas fabricadas mediante manufactura aditiva en la condición “as-welded”.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 Implementación del Proceso WAAM

Para la implementación del sistema WAAM se utilizó un robot industrial KUKA KR 125, con capacidad de movimiento en 6 ejes, cortesía del Centro Integrado de Manufactura y Automatización (CIMA) USM y un equipo de soldadura por arco GMAW/MIG de marca ESAB modelo Origo Mig 652cw y feeder Origo Feed 304 facilitado por el Laboratorio de Procesamiento de Materiales del Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales USM.

Para acoplar estos dos equipos se fabricó un soporte de diseño propio que permitió la sujeción de la torcha al brazo del robot. Estos equipos en su conjunto conforman el sistema WAAM (ver Figura 9).



Figura 9 Implementación del sistema WAAM

La fabricación se realizó sobre un sustrato de acero SAE 1020 como base sobre el cual se depositó el material. Como material de aporte se utilizó un alambre MIG inoxidable ER308L de 1,2 mm de diámetro y el gas protector utilizado fue Argón.

Si bien la mayoría de los estudios que se realizan sobre este tema utilizan los aceros más comunes como el AISI 304, AISI 316 o AISI 316L; se elige el uso del acero AISI 308L por disponibilidad del material, sin embargo al ser ambos aceros austeníticos con composición y propiedades similares, se puede esperar resultados similares en cuanto a tendencias y

estructuras encontradas, y estudios que se realizaron con estos materiales resultan un buen punto de comparación.

Para el sustrato, el material base que se utilizó fue una barra de acero al carbono SAE 1020, si bien lo ideal hubiera sido utilizar un material base igual al material de aporte, se decidió que era necesario utilizar una base lo suficientemente espesa para evitar combadura y aumentar la velocidad de enfriamiento, para lo cual una barra de acero reciclada era más conveniente. Se realizaron pruebas preliminares para determinar el alcance de la difusión del sustrato en la pieza, se determinó que las 4 primeras capas ven comprometida su composición química, por lo que se descartan por la difusión de elementos del sustrato y las siguientes corresponden en su totalidad al material de aporte depositado.

Para caracterizar las propiedades del producto WAAM, se realizaron ensayos de tracción utilizando una máquina de ensayos universales Z030 AllroundLine Zwick-Roell, para la medición de macrodureza se utilizó un durómetro Rockwell ZHR Zwick-Roell y, finalmente, el análisis metalográfico se realizó utilizando un microscopio metalográfico Zeiss Axiovert 7.

En esta etapa se configuró el equipo WAAM. Esta configuración consistió en acoplar el robot industrial KUKA con el equipo de soldadura por arco GMAW/MIG alimentado por alambre de acero inoxidable ER 308L. Esta etapa incluyó la revisión de las capacidades de ambos equipos, análisis de las conexiones de control y alimentación e identificación de necesidades de conectores, cables o piezas necesarias para la implementación, se planifica la operación en el espacio asignado, definiendo configuración espacial de los equipos y consideraciones de seguridad. Procuración de materiales, consumibles y equipamiento también son consideradas en esta etapa.

En esta etapa se preparan los modelos CAD para la fabricación de piezas, donde los modelos CAD son las geometrías fabricadas con el software Autodesk Inventor®, las cuales son placas de 120x130x10 mm, geometrías que se usaron como base para la programación de la fabricación de la pieza en el sistema de control integrado del robot KUKA, utilizando los parámetros detallados en la Tabla 3.

Tabla 3 Parámetros de Fabricación

Parámetros de fabricación				
Voltaje	V de pasada	V del hilo	Corriente	HI
V	mm/min	m/min	A	J/mm
16	198	4	90	349
18	300	4	104	300
20	400	5	120	288

Además, se incluyó el proceso de programación del robot KUKA, al no ser un equipo especializado en manufactura aditiva, no es posible ordenar directamente al robot la fabricación de una geometría, por lo que fue necesario programar la trayectoria del robot para formar cada capa. Para esto también fue necesario medir con anticipación las dimensiones de los cordones que genera la máquina MIG, ya que en base a eso se programó una distancia entre cordones de 3,5 mm y una altura de cada capa de 5 mm, aunque esta altura es variable y fue ajustada manualmente cuando se consideró necesario, estas distancias están definidas por movimientos lineales en el sistema de coordenadas del robot.

El programa se escribió utilizando el lenguaje de programación KRL - KUKA Robot Language [14], específico para el manejo de estos robots, el programa, detallado en el Anexo 1, fue diseñado para realizar capas superpuestas de 3 cordones de ancho, en base a una función que controla la fabricación de cada cordón, a la que se le entrega el punto inicial, la separación entre cordones y el largo de la placa. Parámetros como el tiempo de espera entre pasada, tiempo entre capas y desplazamiento en el eje z de la torcha también son controlados mediante el programa, mientras que voltaje y velocidad del hilo deben ser controlados directamente en la máquina de soldar.

2.2 Pruebas Preliminares

Se realizaron pruebas preliminares para confirmar la factibilidad práctica de los parámetros, se desarrollaron pruebas en sitio de los equipos por separado, se detectaron dos problemáticas principales, la necesidad de un adaptador que permita a la torcha ser sostenida firmemente por el robot KUKA y la posibilidad de que la aceleración del robot al comenzar y terminar cada movimiento produzca discontinuidades en la placa fabricada.

Para solucionar la primera problemática se diseñó y fabricó un “holder”, un accesorio que permite sostener firmemente la torcha a la vez que se ensambla con pernos al accesorio del robot KUKA (ver Figura 10), el segundo se pudo solucionar mediante la programación del robot, usando el comando para movimiento lineal “LIN” que permite control total de la trayectoria y la velocidad.



Figura 10 Accesorio "Holder" para sujeción de la torcha al robot KUKA

En paralelo a la fabricación del holder, se realizaron pruebas preliminares con cordones de soldadura fabricados con GMAW, se fabricaron cordones individuales en pletina y con parámetros similares a los a utilizar en el experimento WAAM, con el objetivo de determinar las dimensiones del cordón generado con cada pasada e identificar la formación de microestructuras y tamaño de la ZAT para cordones individuales, estas muestras preliminares fueron analizadas mediante metalografía. Para asegurar velocidad de pasada constante y controlada, se adaptó una mesa de corte con la torcha MIG, de tal manera que la velocidad estuvo controlada con un husillo y programada mediante un computador, asegurando así una velocidad de pasada constante de 300 mm/min, el sistema y los cordones de prueba fabricados con 14V, 18V y 22V obtenidos se presentan en la Figura 11, debido a que los cordones de alto y bajo voltaje presentan dimensiones irregulares se ajustó el voltaje y la velocidad de pasada, hasta llegar a los set de parámetros finales que mostrados en la Tabla 3.



(a)



(b)

Figura 11 (a) Sistema de soldadura para pruebas preliminares, (b) Cordones de soldadura de pruebas preliminares a 14V, 18V y 22V

Posteriormente, se realizó el análisis metalográfico de las pruebas preliminares, las muestras fueron cortadas mediante una cortadora abrasiva y con el uso de refrigerante, la preparación metalográfica se realizó mediante lijado y pulido con alúmina hasta $0,04 \mu\text{m}$, para luego realizar un ataque químico con el agente de Marble's, en acorde al Metals Handbook vol.9 [15], aunque finalmente se acabó utilizando una variación de agua regia para el análisis final, ya que se observaba con mayor claridad el contraste de fases.

Terminadas las pruebas preliminares, se procedió a crear el programa de fabricación para el robot KUKA (ver Anexo 1), una vez completadas también se realizaron cordones individuales de prueba utilizando el holder. Fue en este punto que se decidió realizar el experimento sobre un bloque de acero al carbono en vez de una pletina como se planeó originalmente, dado que se presentaba combadura (ver Figura 12a), se intentó solucionar con sujeción mecánica y precalentamiento, pero estas opciones no evitaban el problema.

Luego de tomada la decisión de utilizar como sustrato un bloque de acero, se realizaron las pruebas de difusión para la soldadura sobre acero al carbono (ver Figura 12b), para determinar el nivel de difusión de elementos (principalmente carbono) en el cordón depositado y así decidir una altura donde se puede desprejar este efecto.

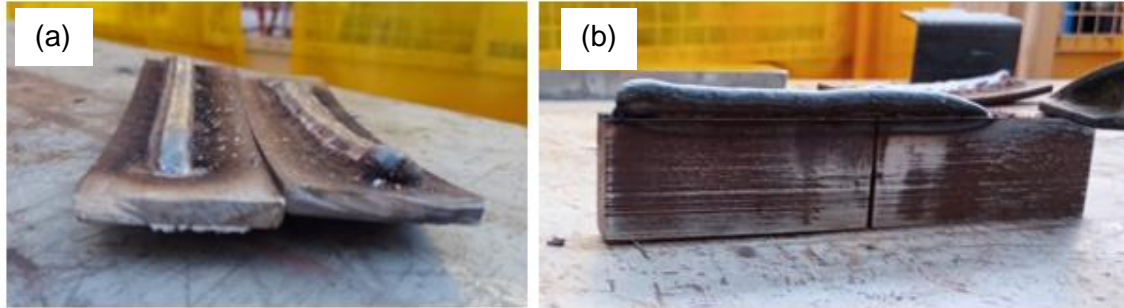
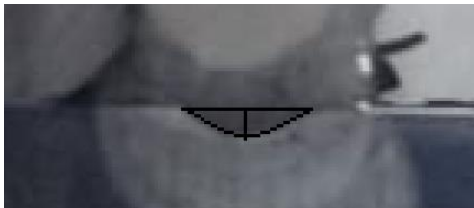


Figura 12 Pruebas preliminares (a) Sobre pletina, presenta combadura, (b) Sobre bloque de acero (4 cordones)

De acuerdo a esta prueba, se analizó la penetración del cordón sobre el sustrato, la cual se asume corresponde a su vez al volumen fundido que termina mezclándose con el material de aporte, considerando que este volumen se mezcla en cantidades iguales y que este volumen es proporcional a la sección transversal, en la Figura 13 se muestra el análisis, donde se analiza en base a el área fundida considerando el área de penetración un semicírculo, se obtuvo que hay una mezcla de 14% entre el cordón y el sustrato.



Área estimada		
Penetración	2,17	mm ²
Cordón	15	mm ²
Mezcla	14%	

Figura 13 Análisis de difusión, cálculo de penetración del cordón

Luego, se elige como criterio un límite de 5% de impureza en el %C para considerarse aceptable, calculando la composición de cada cordón utilizando el criterio de 14% de mezcla se obtiene la composición de los cordones siguientes como ilustra la

% Mezcla	% C				
	Base	Cordón 1	Cordón 2	Cordón 3	Cordón 4
14%	0,2	0,04520	0,02353	0,02049	0,02007

Metal Base	Metal de aporte
0,2	0,02

desde el tercer cordón es aceptable y puede considerarse que su composición es la misma que la del metal de aporte, considerando posibles irregularidades en la penetración del cordón se consideró para este trabajo que los primeros 4 cordones se descartan de cualquier análisis, dada su potencial contaminación por el sustrato.

Tabla 4 Análisis de difusión, Criterio de aceptabilidad (Rojo: No cumple, Verde: Cumple)

% Mezcla	% C				
	Base	Cordón 1	Cordón 2	Cordón 3	Cordón 4
14%	0,2	0,04520	0,02353	0,02049	0,02007

Metal Base	Metal de aporte
0,2	0,02

Las pruebas preliminares con el robot, al realizar cordones superpuestos demostraron que es necesario variar los parámetros de cada cordón para las distintas placas, ya que los parámetros de fabricación son distintos y genera distintas morfologías de cordón, sin embargo también se encontró que los valores de tiempo de espera y desplazamiento en el eje z de la torcha deben ser controlados por el operador durante la fabricación de una misma placa, ya que los tiempos de enfriamiento varían al aumentar el número de capas depositadas y pequeñas variaciones en la morfología de los cordones hacen necesario el constante ajuste de la altura de la torcha para evitar que la longitud del arco sea muy pequeña, caso en el que se corre el riesgo de fundir la boquilla, o muy larga, caso en el que el arco se vuelve irregular.

2.3 Fabricación de placas

En esta etapa se fabricaron las placas de acero inoxidable mediante el método WAAM con las variables de proceso resumidas en la Tabla 3, en la cual se incluye el calor de aporte asociado a cada prueba. Se obtuvieron 3 placas fabricadas con bajo, medio y alto aporte calórico. Es importante mencionar que la máquina GMAW utilizada no permite el control directo de la corriente, sino que esta se controla automáticamente con el voltaje para mantener un arco estable, por lo tanto, las corrientes especificadas en la Tabla 3 son referenciales y pueden variar ligeramente durante el proceso. Adicionalmente, el flujo de gas argón fue de 8 L/min y el diámetro del alambre fue de 1.2 mm, parámetros que se mantuvieron constantes para todas las placas.

La etapa de fabricación fue por mucho la de mayor duración, principalmente debido a la dimensión de las piezas y el tiempo disponible para uso del laboratorio en el CIMA, el proceso si bien se pudo realizar satisfactoriamente, no pudo automatizarse en su totalidad, ya que supervisión humana constante fue necesaria durante todo el proceso. Parte de la razón de esto fue que a lo largo de la pieza se producen variaciones en el alto del cordón que requerían constantemente pequeños ajustes en cuanto a la distancia de la torcha al cordón previo, también fue necesario controlar la temperatura para evitar sobrecalentamiento, este control se realizó manualmente con un pirómetro, cuidando de

evitar hacer el siguiente cordón mientras el material sobre el cual se fabricará esté sobre los 300 °C.

Otro problema que se presentó en el procedimiento fue el crecimiento disparejo de la placa, donde la altura del tercer cordón de los tres paralelos que conforman un piso tendía a crecer más rápido que el segundo, y este que el primero, esto creó la necesidad de agregar un “cordón compensatorio”, que es un cordón extra sobre el primer cordón de la capa, el cual se agregaba cuando esta diferencia de crecimiento comenzaba a ser notoria, la cantidad y frecuencia de estos cordones compensatorios varió según el set de parámetros escogido, siendo estos menos frecuentes al disminuir el aporte calórico.

2.4 Análisis

Posteriormente, se extrajeron probetas de tracción, de geometría plana y tamaño sub-size con dimensiones estipuladas en la norma ASTM E8 [16]. El esquema de extracción de probetas de extracción se presenta en la Figura 14. Se observa que se extrajeron 2 probetas transversales en las zonas inferior (HI: Horizontal Inferior) y superior (HS: Horizontal Superior) y 2 en la dirección de construcción, en la zona media (VC: Vertical Centro) y en el borde de la placa (VO: Vertical Orilla). Asimismo, de la misma placa se extrajo una sección para determinar el perfil de dureza y realizar caracterización metalográfica.

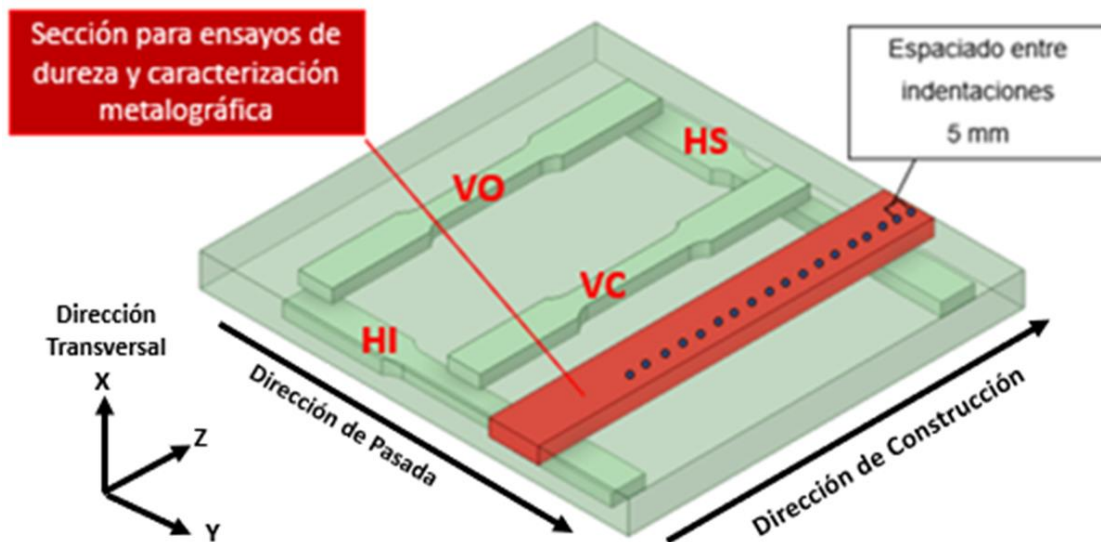


Figura 14 Distribución de las probetas de tracción y sección de análisis metalográfico y de dureza (resaltado en rojo) a obtener (Fabricación propia en Ansys SpaceClaim)

Se realizaron mediciones de macrodureza a cada una de las placas en una zona alejada de los bordes, utilizando un durómetro y midiendo en escala Rockwell B (HRB), se realizaron indentaciones como se ilustra en la zona destacado en rojo en la Figura 14, desde la parte superior de la placa hacia abajo y con una separación de 5 mm entre mediciones, donde las primeras mediciones corresponden a el último cordón depositado, estas mediciones se realizaron en triplicado, reportándose el promedio de las mediciones.

Luego, para el resto de las propiedades mecánicas se realizó un ensayo de tracción a las 4 probetas obtenidas en cada placa, desde donde se obtuvieron los datos de esfuerzo máximo (UTS), esfuerzo de fluencia (YS) y elongación máxima (%el). El ensayo se realizó acorde a la norma ASTM E8 [16] en un máquina de ensayos universales, con una velocidad de cabezal de 3 mm/min, para un modelo estático, el %el se obtuvo comparando la longitud de las probetas antes y después del ensayo.

Es necesario mencionar que la placa de alto HI (16V) presentó defectos, se observa en la Figura 15 que se presentaron algunas cavidades internas que generaron dificultades para las mediciones, las cuales no pudieron observarse hasta que se realizaron los cortes, estas siguen la dirección de pasada y se presentaron principalmente en la placa de alto aporte calórico, al punto que no se pudo realizar un ensayo válido de probetas verticales en esta placa, ya que estas fisuras provocaron la fractura prematura de las probetas durante los ensayos, cabe mencionar que debido a la direccionalidad de estos defectos, no afectan de manera significativa las mediciones en dirección horizontal, que se realizaron sin inconvenientes.

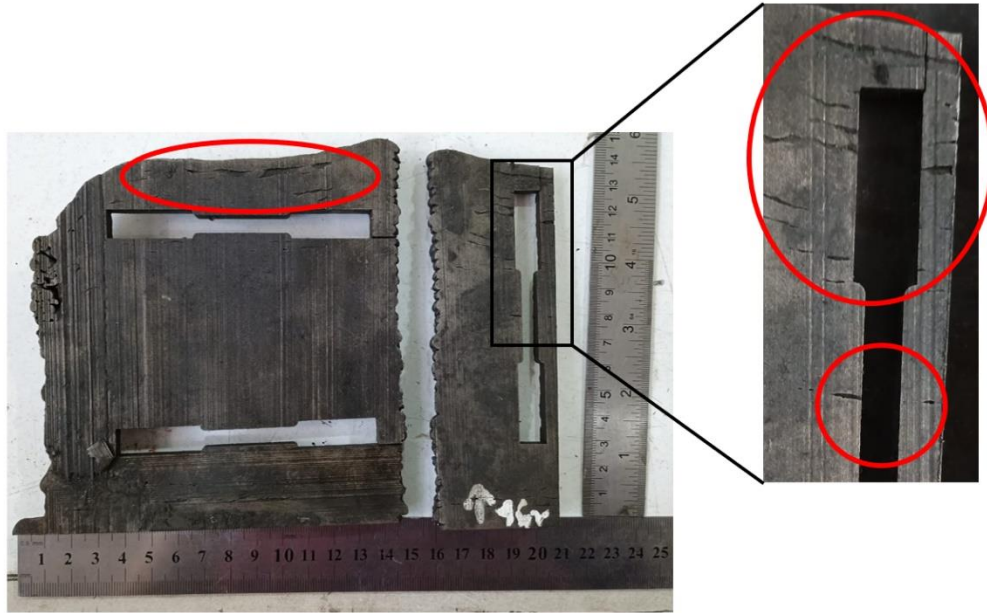


Figura 15 Defectos en la placa de bajo HI (16V)

Por último, el análisis metalográfico se realizó mediante microscopía óptica, las zonas observadas se obtuvieron de una sección extraída de la parte central de la placa (ver Figura 14), observando la sección transversal del corte en zonas inferior, media y superior de la placa de acuerdo a la dirección de construcción, observándose la evolución de la microestructura desde la base hasta la cima, se tomaron capturas de estas zonas con aumentos de 50x, 100x, 200x, 500x y 1000x, reportándose las más relevantes. Se realizaron mediciones de espaciado interdendrítico para determinar el tamaño de las estructuras presentes, para esto se midieron 10 muestras por zona a aumentos de 200x y 500x, reportándose los valores promedio y su dispersión en forma de desviación estándar.

La preparación de probetas se realizó con corte abrasivo utilizando refrigerante, montaje de las probetas en baquelita, lijado, pulido y atacado químicamente con una mezcla de 5 ml HNO_3 , 10 ml HCl y 15 ml H_2O (Variación de agua regia diluida) [17], recomendado en general para ataque de aceros inoxidables austeníticos, ya que permite la fácil diferenciación entre la fase austenítica y la ferrítica [15].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Fabricación

Se logró fabricar satisfactoriamente las 3 placas (ver Figura 16), con las dimensiones deseadas, aunque la geometría varía dependiendo de los parámetros utilizados, ya que las dimensiones de los cordones son distintas y las diferencias de aporte calórico también afectan el nivel de distorsión en los extremos, generado por la velocidad de enfriamiento.

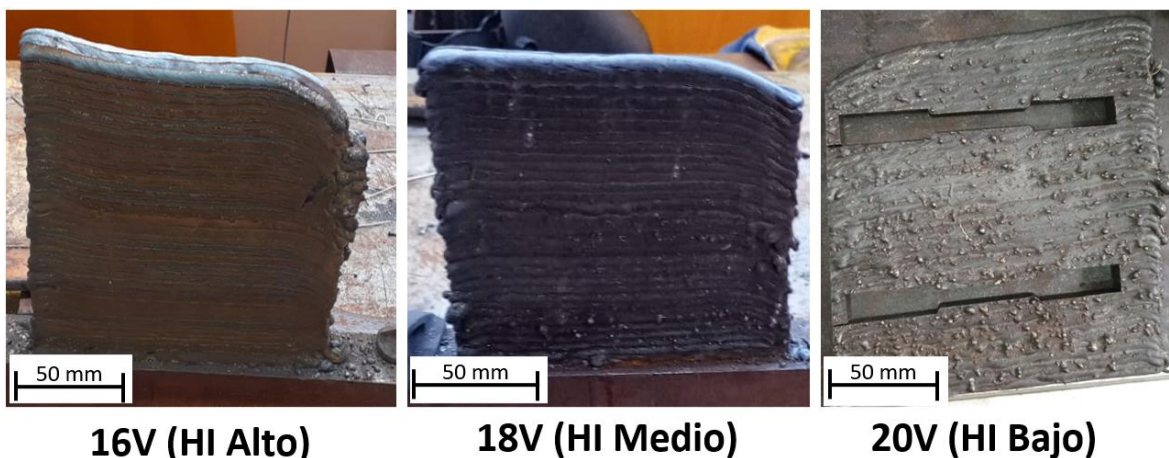


Figura 16 Geometría final de placas fabricadas por WAAM

Si bien la geometría de los cordones provoca que en la cola de estos la placa tenga una disminución de altura, esto se consideró en las dimensiones de fabricación, obteniéndose una geometría sobredimensionada (ver Tabla 5) para permitir la obtención de probetas de manera cómoda.

Tabla 5 Dimensiones finales de las placas

Placa	Dimensiones finales			Base mm
	16V mm	18V mm	20V mm	
Altura	144	125	124	16
Largo	132	131	132	132
Ancho	15,8	17,5	17,7	20

3.2 Dureza

Se realizaron mediciones de macrodureza para determinar la existencia de tendencias de dureza en función de la altura de la placa, debido a que las últimas capas fabricadas son expuestas a un menor número de ciclos térmicos, por lo que se espera que muestren diferencias respecto al resto de la placa.

Los resultados generales en forma de valores promedio se presentan en la Tabla 6, mientras que la Figura 17 muestra la distribución de las mediciones en un perfil de dureza. Para su comparación se tienen los valores esperados para el material de aporte en estado “as welded”, presentados en la Tabla 7 [18].

Tabla 6 Dureza de placas fabricadas por WAAM

	Dureza HRB		
	16V	18V	20V
Promedio	85,7	84,6	87,9
Desv. Est.	1,9	1,5	2,1

Tabla 7 Valores referenciales para la aleación ER 308L

Aleación	HRB	UTS	YS	%el	Condición
ER 308L	85	600	393	34%	As welded

La Figura 17 muestra el perfil de dureza medido en la pieza fabricada, el promedio aparece representado por una línea discontinua y su comparación con respecto a la dureza esperada de la misma aleación presentadas como línea continua para la aleación ER 308L en condición “as welded” (línea roja).

Se encuentra en base a los perfiles de dureza, que las propiedades rondan los valores esperados de la aleación, pero presentan unas claras tendencias, donde la dureza promedio tiende a ser mayor para bajo aporte calórico. Otras tendencias notorias es la baja dureza en la primera medición, esto se debe a que este dato corresponde al cordón superior de la placa, que no recibió ciclos térmicos posteriores, por lo cual los datos de las primeras mediciones son irregulares y con tendencia a ser bajos; cabe mencionar que esta sección

superior se descarta para la fabricación de probetas, por lo que no produce ruido en los datos obtenidos en los ensayos de tracción.

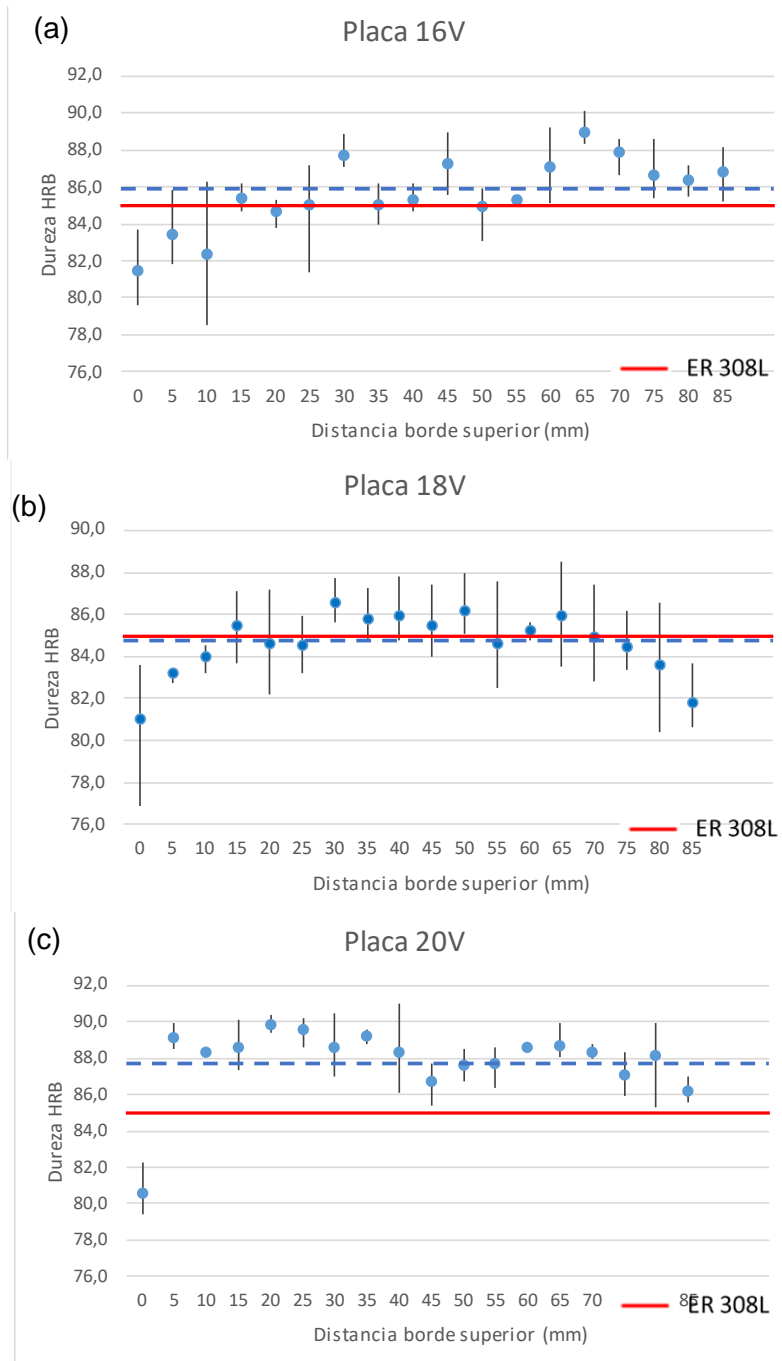
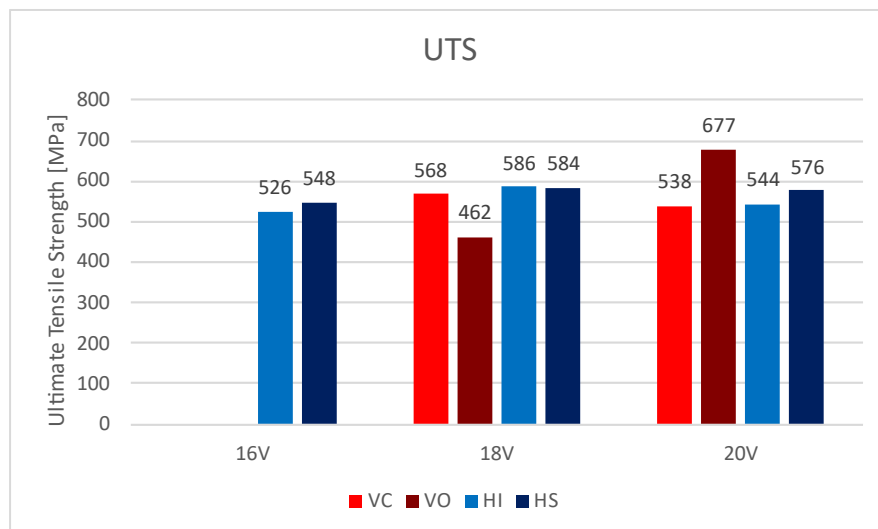


Figura 17 Perfil de macrodureza de placas fabricadas por WAAM según set de parámetros (a) Alto HI (16V), (b) Medio HI (18V), (c) Bajo HI (20V)

3.3 Ensayos de tracción

Las propiedades mecánicas se obtuvieron mediante un ensayo de tracción, donde se busca comparar las propiedades para los tres set de parámetros de fabricación, así como comparar los resultados según la posición de las probetas (ver Figura 14), los resultados obtenidos de las propiedades de esfuerzo de fluencia (YS), esfuerzo máximo (UTS) y elongación máxima (eI%) para las placas fabricadas por WAAM se presentan en la Figura 18, valores obtenidos a partir de curvas esfuerzo-deformación.

No se reportaron resultados de probetas verticales para alto HI porque esta placa presentó defectos (ver Figura 15), generando discontinuidades que provocaron la fractura prematura de las probetas.



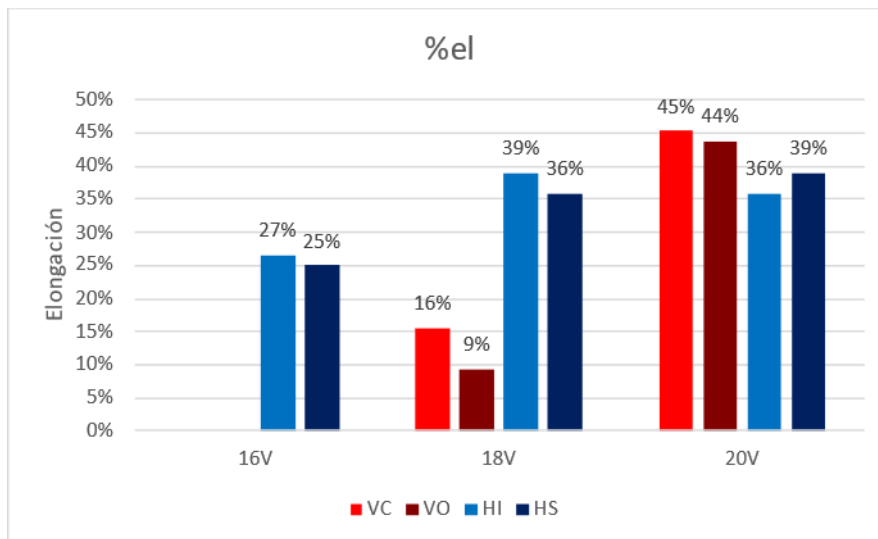
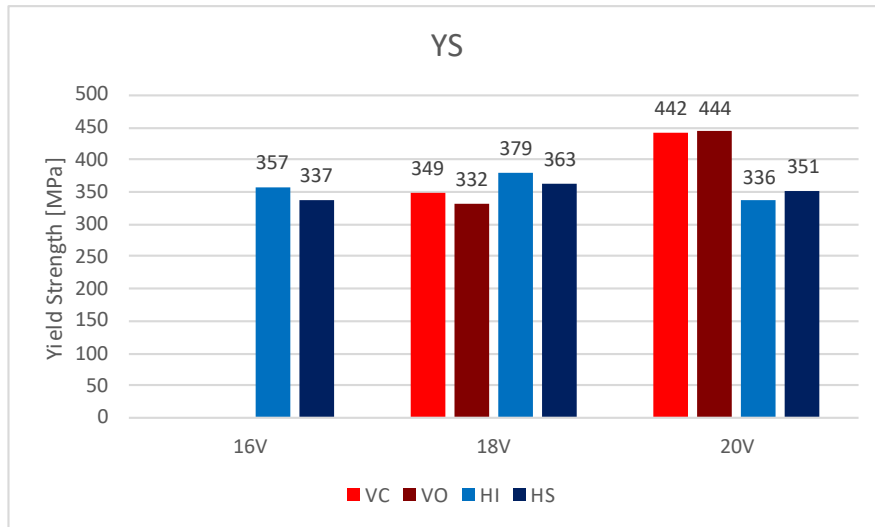


Figura 18 Propiedades mecánicas obtenidas en las posiciones VC: Vertical Centro, VO: Vertical Orilla, HI: Horizontal Inferior y HS: Horizontal superior para las 3 placas

3.4 Caracterización Metalográfica

Se realizó un análisis metalográfico de las placas, a fin de observar las morfologías generadas bajo los distintos parámetros y como estas varían dependiendo de la altura dentro de la misma placa, lo cual puede explicar algunos comportamientos en las propiedades resultantes de la placa.

A modo general, se presentan las microestructuras esperadas, una matriz austenítica con ferrita δ residual, esta se presentó principalmente como las morfologías: “Vermicular” y “Lacy”, que son las morfologías de ferrita dominantes en las piezas fabricadas, puede verse

la comparación en la Figura 19 donde las imágenes inferiores muestran las estructuras encontradas en este trabajo comparadas a las morfologías descritas en la literatura [10]. La morfología varía tanto entre piezas como dentro de la misma pieza, específicamente en los límites de fusión de los cordones, en la zona refundida y en la ZAT.

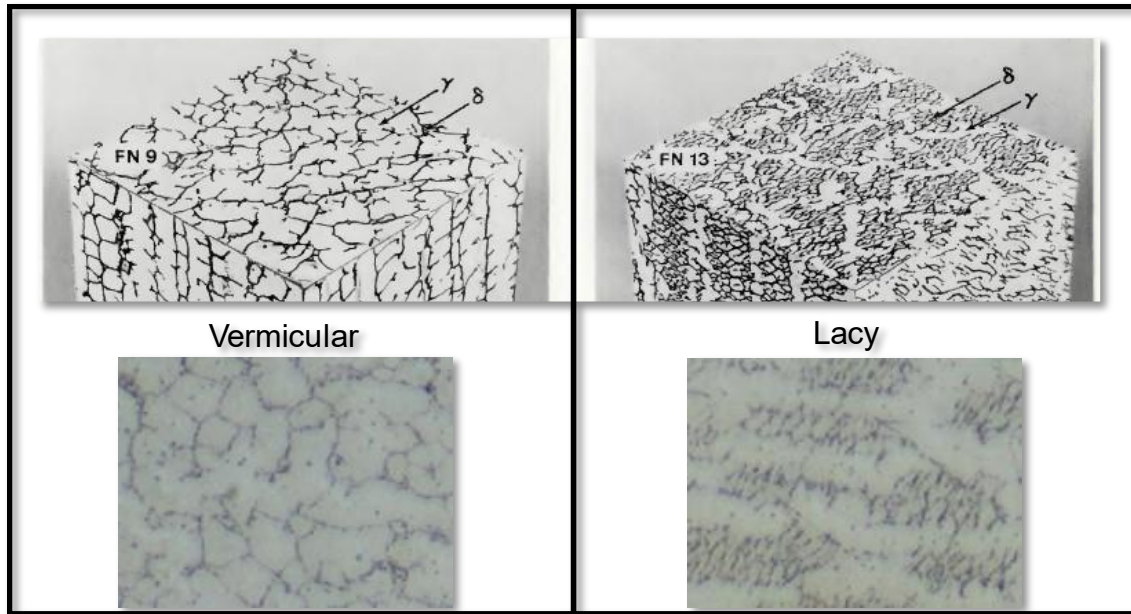


Figura 19 Morfologías Lacy y Vermicular.

Si bien al medir el espaciado dendrítico primario (Tabla 8) se puede apreciar una tendencia general donde las placas de menor aporte calórico presentan estructuras más finas, esto viene acompañado de una alta variabilidad, especialmente en las zonas superiores.

La placa de alto aporte calórico presenta ferrita con una morfología mayoritariamente vermicular, aunque también presenta la morfología lacy, específicamente en las zonas cercanas a los límites de cordón, se observa también de manera notoria el crecimiento dendrítico en la zona superior (Figura 20a), mientras que en la zona media (Figura 21a) la estructura dendrítica desaparece, en la zona baja (Figura 22a) se ve direccionalidad marcada de las estructuras, atribuible a crecimiento epitaxial que se ve más marcado al ser la zona cercana a la base, con enfriamiento más rápido.

Para el caso de la placa de 18V o aporte calórico medio también se observa ambas morfologías (vermicular y lacy), sin embargo la morfología lacy es más común, apareciendo incluso fuera de la ZAT, siendo predominante en la zona media de la placa (ver Figura 21b),

dando paso a la vermicular en los extremos superiores e inferiores, también presenta morfología dendrítica sólo en las capas superiores (Figura 20b), una diferencia notable es la homogeneidad de la microestructura dentro de los cordones en comparación con la placa de 16V, donde se aprecia más claramente los cambios en la dirección de crecimiento, aunque también se ve los cambios bruscos de microestructura en los límites entre cordones, como se aprecia en la Figura 22b, donde se observa el límite de un cordón y como cambia la morfología de la ferrita.

Por último, en la placa de bajo aporte calórico se aprecian tendencias similares a la de 18V, mayor predominancia de la morfología lacy y mayor homogeneidad comparado a la de 16V, sin embargo se diferencia notablemente en el tamaño de la estructura, donde en esta placa se formaron estructuras consistentemente más finas, con valores de espaciado dendrítico primario más pequeño y menos variable (ver Tabla 8), a esto se suma una mayor proporción de morfología lacy, que es considerablemente más fina con un espaciado interdendrítico secundario en un rango de 1-3 μm , en contraste a la morfología vermicular, con un espaciado brazos dendríticos que varía en un rango de 7-9 μm (Notar que todas las fotografías presentadas en las figuras 20, 21 y 22 tienen el mismo aumento de 200x).

Tabla 8 Espaciado dendrítico para dendritas de ferrita delta

Espaciado dendrítico primario			
Placa	Zona	λ_1 μm	Desviación Estándar
16V	Superior	13	3
	Media	12	5
	Inferior	11	3
18V	Superior	12	2
	Media	11	3
	Inferior	8	2
20V	Superior	9	2
	Media	8	1
	Inferior	9	2

Espaciado Dendrítico Secundario	
Vermicular μm	Lacy μm
7-9	1-3

Al relacionar las propiedades mecánicas medidas con las metalografías, se pueden relacionar algunos puntos, la obtención de mayor dureza, resistencia y ductilidad demostrada por la placa fabricada con bajo aporte calórico concuerdan con las estructuras más finas observadas. La falta de homogeneidad y presencia de estructuras dendríticas también explicarían porque las probetas horizontales inferiores en general muestran una

resistencia mecánica ligeramente superior a las superiores. Mientras que la anisotropía en las propiedades mecánicas puede atribuirse a los constantes cambios de estructura en la dirección de construcción (eje z).

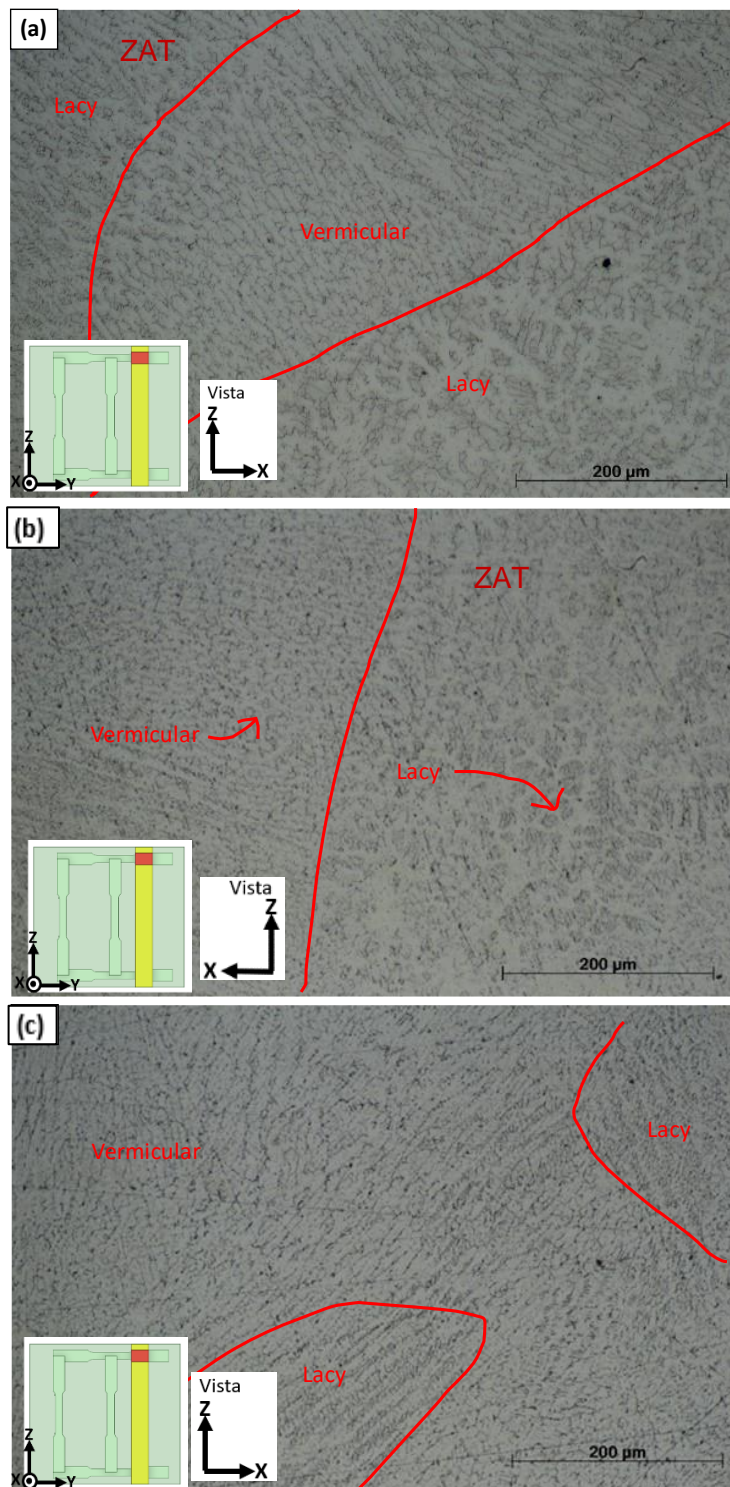


Figura 20 Metalografías 200x, comparación de la zona alta de las placas fabricadas con (a) HI alto, (b) HI medio y (c) HI bajo

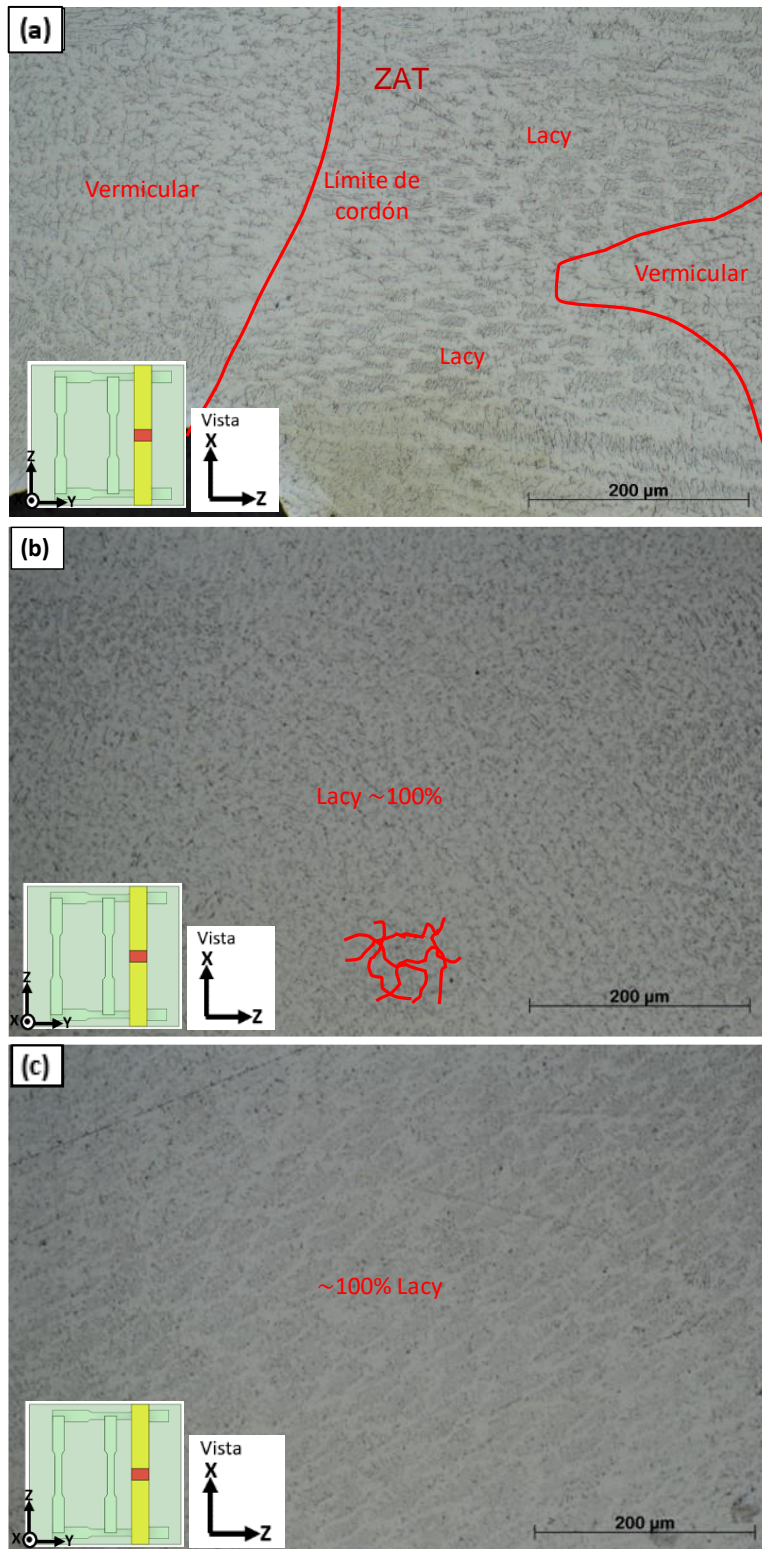


Figura 21 Metalografías 200x, comparación de la zona media de las placas fabricadas con (a) HI alto, (b) HI medio y (c) HI bajo

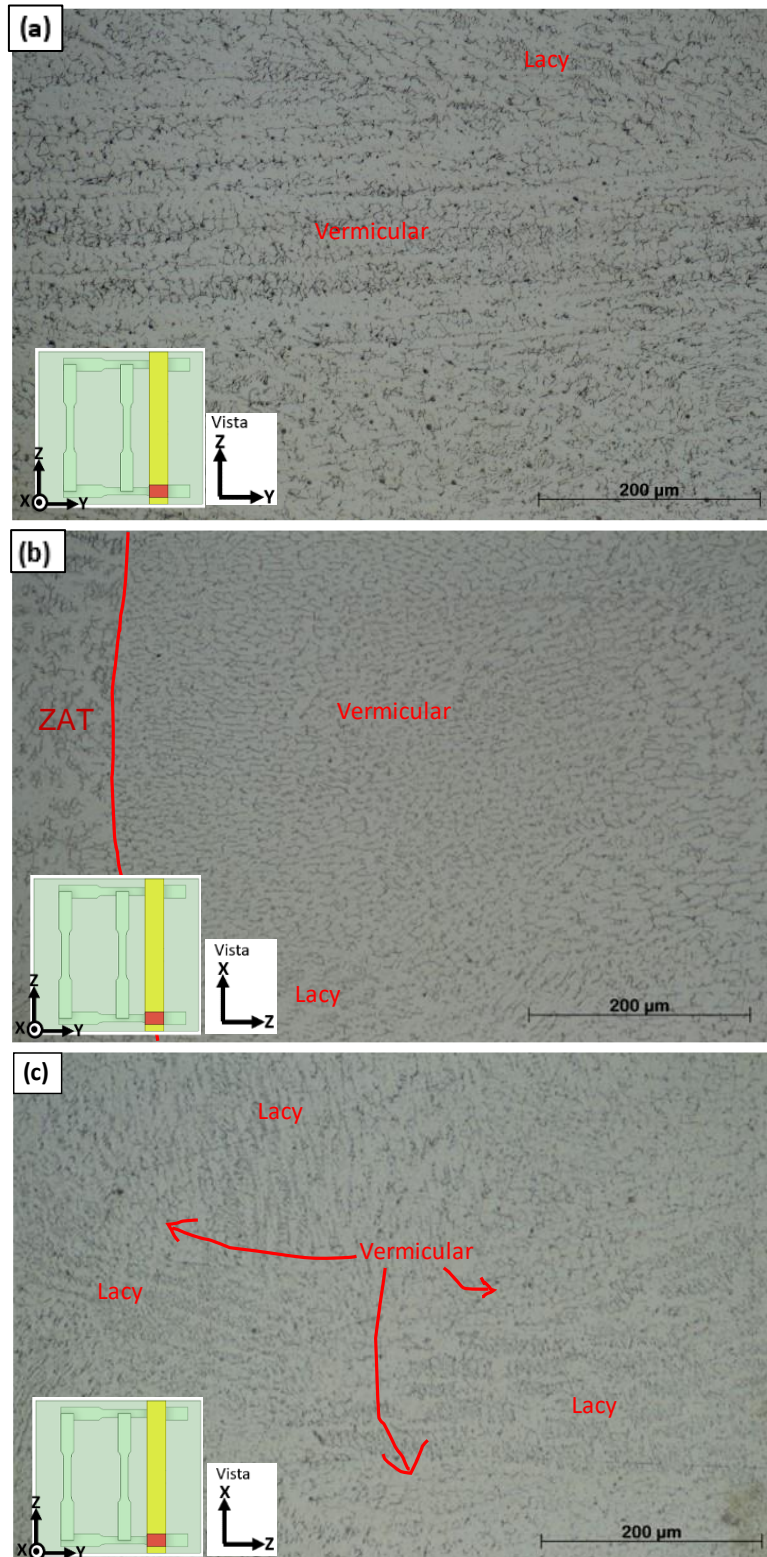


Figura 22 Metalografías 200x, comparación de la zona baja de las placas fabricadas con (a) HI alto, (b) HI medio y (c) HI bajo

3.5 Discusión y Recomendaciones

Este trabajo confirmó que es posible fabricar una pieza siguiendo pautas convencionales de soldadura MIG adaptadas al método WAAM, pero el set de parámetros específico tiene altas repercusiones en las propiedades de la pieza resultante. Si bien el set de parámetros de 16V (Alto HI) produjo una pieza aparentemente aceptable, sus propiedades mecánicas no alcanzaron los estándares esperados para el material en estado “as welded”, además de presentar defectos internos, lo cual sólo fue detectado cuando se realizaron cortes a la placa, por estas razones no se recomienda el uso de estos parámetros para manufactura.

Por otro lado, el set de 18V (Medio HI) se considera aceptable, ya que las propiedades resultantes se encuentran dentro del rango aceptable para la aleación, pero consideraciones deben tenerse en cuenta, principalmente la falta de ductilidad en la dirección vertical. Podría utilizarse este set de parámetros si esta propiedad no es relevante para la geometría a fabricar. Finalmente el set de 20V (bajo HI) ofrece un mejor rendimiento en cuanto a propiedades, superando tanto a los resultados de las otras 2 placas como a las expectativas en cuanto al material en estado as welded. Sin embargo, su principal desventaja es la dificultad de fabricación, al utilizar mayor velocidad de pasada con mayor intensidad de corriente, es la que requiere mayor cantidad de cordones y la morfología es más difícil de controlar, además de presentar más salpicadura que con otros parámetros, estas dificultades podrían hacerlo menos recomendable dependiendo de la geometría de la pieza a fabricar.

En cuanto a la implementación del sistema, tiene mayor potencial de control automatizado. Actualmente, la intervención del operario es constantemente necesaria para controlar la longitud de arco y la temperatura antes de cada pasada. Existe espacio para mejora en estos ámbitos, ya que con mayor tiempo y recursos, es factible habilitar un control integrado de temperatura mediante pirómetro o cámara termográfica, que evite que el programa comience a soldar si detecta mayor temperatura a la recomendada, asimismo también es posible implementar un control de proximidad que controle y mantenga constante la distancia entre la torcha y el sustrato, permitiendo así a la máquina ajustarse automáticamente a pequeños cambios de altura entre cordones, estas mejoras aumentarían considerablemente la productividad del sistema, reduciendo la necesidad de pausas y la atención humana requerida para su operación.

Debido a que se utilizó control manual para la temperatura y correcciones de posición de la torcha en caso de irregularidades en los cordones, se generaron distorsiones en la geometría. Estas irregularidades son más marcadas al utilizar calor de aporte bajo y alto, por lo que en cuanto a morfología más estable y facilidad de fabricación y control de la geometría un calor de aporte medio es favorable. También se considera en retrospectiva que para un uso más eficiente del material, utilizar una dirección de pasada intercalada, podría reducir la variación de altura en los extremos de la placa, ya que esto se genera por la acumulación de pequeñas variaciones de altura en los extremos de cada cordón, que tienden a ser más altos al inicio del cordón y más bajos en el final.

En las mediciones de macrodureza se observó que las últimas capas (zona superior) presentan dureza más baja que el resto de la pieza debido a su exposición a menor cantidad de ciclos térmicos y menor velocidad de enfriamiento. Al comparar los valores promedio con el valor esperado de la aleación como soldadura “as welded” (85 HRB), podemos observar que la placa fabricada por WAAM alcanza valores similares con HI medio (84,6 HRB) y alto (85,7 HRB), mientras que para bajo HI la dureza es mayor a la esperada para el material (87,9 HRB), por lo que sería recomendable si se busca maximizar esta propiedad en la pieza.

Los resultados obtenidos de los ensayos de tracción presentaron tendencias interesantes, como la mayor ductilidad en el caso de bajo HI y anisotropía marcada en la fluencia del caso de bajo HI y la ductilidad en el caso de HI medio, sin embargo otras tendencias resultan difíciles de determinar debido a la falta de datos, dado que el material y tiempo de trabajo es limitado, realizar varias repeticiones del experimento no es viable, y comparaciones entre valores similares, como se da al comparar probetas horizontales superiores e inferiores, dan resultados lo suficientemente cercanos como para que la diferencia entre ambos sea atribuible a errores de medición o pequeñas diferencias en el proceso de fabricación. Para encontrar tendencias en estos casos se recomienda considerar experimentos más simplificados y enfocados en propiedades específicas para así hacer factible hacer una mayor cantidad de repeticiones en las mediciones y así identificar datos anómalos y la variabilidad que es intrínseca al método de fabricación.

Al observar la microestructura, las tres placas mostraron una matriz austenítica con ferrita δ residual. Esta ferrita se presentó en morfologías vermicular y lacy, aumentando la

proporción de esta última a menor calor de aporte. También se pudo observar que la morfología lacy aparecía preferentemente en la ZAT de los cordones, aunque también se encontraba en otras zonas para las placas fabricadas con bajo HI. Debido a una mayor proporción de la morfología lacy, las estructuras fueron más finas en la placa con menor aporte calórico, concordando con las propiedades mecánicas medidas, también se apreció de forma cualitativa una mayor homogeneidad en la microestructura, sin cambios tan bruscos entre cordones y la morfología dendrítica sólo se apreciaba en la zona superior de la pieza, aunque esta apreciación es limitada a el área observada, por lo que requeriría un estudio de zonas más extensas y distintas direcciones para poder asegurar una tendencia. Otra diferencia observada entre la zona superior y el resto de la pieza es la estructura de solidificación, que es claramente observable en las zonas superiores, pero no se aprecia al bajar en la estructura, también es notorio que desaparece más rápido en las placas de menor aporte calórico.

CONCLUSIONES

Se realizó exitosamente la implementación del método WAAM para piezas de acero inoxidable austenítico en la Universidad Técnica Federico Santa María. El sistema se encuentra instalado en el Centro Integrado de Manufactura y Automatización (CIMA) y consiste en un equipo de soldadura MIG/GMAW acoplado a un robot industrial KUKA, con un programa que permite su operación conjunta para realizar capas de cordones superpuestos. Se fabricaron 3 placas con distintos sets de parámetros, resultando en tres niveles de calor de aporte: alto (349 J/mm), medio (300 J/mm) y bajo (288 J/mm).

Los resultados de macrodureza arrojaron valores promedio de 85,7, 84,6 y 87,9 HRB para las placas de alto, medio y bajo HI respectivamente, por lo que se encuentra que el mayor valor de dureza en la placa se consigue con bajo HI, siendo también la placa con menor variabilidad en la dureza.

Las propiedades mecánicas (YS, UTS y %el), fueron evaluadas a través de ensayos de tracción. Las probetas horizontales fabricadas con alto calor de aporte presentaron propiedades inferiores, con YS de 337 MPa, UTS de 537 MPa y 25,8% de %el; mientras que las verticales presentaron defectos que impidieron un ensayo correcto. En contraste, la placa fabricada con calor de aporte medio exhibió baja anisotropía en valores de fluencia y resistencia a la tracción (UTS), obteniendo en las horizontales 371 MPa y 585 MPa respectivamente, aunque las probetas verticales mostraron baja ductilidad, obteniendo un %el de sólo 12,5% contra los 37,5% de las horizontales. La placa de bajo calor de aporte presentó considerable anisotropía, especialmente en fluencia, con YS de 354 MPa y UTS de 560 MPa obtenido con probetas horizontales en contraste a 442 MPa y 538 MPa en las probetas verticales, en comparación, las probetas verticales resultaron ser más dúctiles, alcanzando un %el de 45% en las verticales y 37,5% en las horizontales.

La microestructura observada fue la esperada, matriz austenítica con ferrita δ residual. Se observó ferrita en morfologías vermicular y lacy. Donde la morfología lacy es la estructura más fina, con un espaciado dendrítico secundario de 1-3 μm en contraste a los 7-9 μm de la morfología vermicular. El espaciado dendrítico primario mostró una tendencia donde la distancia tiende a disminuir al disminuir el aporte calórico, con 12, 11 y 8 μm para alto, medio y bajo HI respectivamente. Asimismo, tiende a disminuir al acercarnos a la zona baja

de la pieza, con 11, 10 y 9 μm al comparar zonas alta, media y baja, sin embargo estas diferencias están acompañadas a una alta dispersión, especialmente en zonas altas de las placas, por lo que estructuras finas y gruesas se distribuyen a lo largo de toda la placa.

REFERENCIAS

- [1] Lincoln Electric, «Lincoln Electric Additive Solutions,» [En línea]. Available: <https://additive.lincolnelectric.com/>. [Último acceso: 21 11 2022].
- [2] P. Zelenski, «Robot Deposition Makes Giant Industrial Mixer Blade: The Cool Parts Show Bonus,» *Additive Manufacturing*, 8 11 2022. [En línea]. Available: <https://www.additivemanufacturing.media/articles/robot-deposition-makes-giant-industrial-mixer-blade-the-cool-parts-show-bonus>. [Último acceso: 5 9 2024].
- [3] N. A. Rosli, M. R. Alkahari, M. F. b. Abdollah, S. Maidin, F. R. Ramli y S. G. Herawan, «Review on effect of heat input for wire arc additive manufacturing process,» *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 11, pp. 2127-2145, 2021.
- [4] ScienceDirect, «ScienceDirect Article Search,» ScienceDirect, 8 2024. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/search?q=waam&lastSelectedFacet=years>. [Último acceso: 8 2024].
- [5] Lincoln Electric, «Lincoln Electric Works with Chevron to Accelerate Refinery Maintenance Using Lincoln Electric's 3D Metal Printing Solution,» *Metal AM*, 2022. [En línea]. Available: <https://shorturl.at/HYeCa>. [Último acceso: 2022].
- [6] S. Kou, «Welding Metallurgy, Second Edition,» Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2003, p. 223.
- [7] ASM International, «Metals Handbook vol. 6 Welding, Brazing, and Soldering,» 1993, p. 103.
- [8] Indura Chile, «Indura.cl,» Indura, [En línea]. Available: <https://www.indura.cl/Web/CL/1022723/alambre-316-l-0-9mm-indura/4>. [Último acceso: 28 11 2022].
- [9] X. Chen, J. Li, X. Cheng, B. He, H. Wang y Z. Huang, «Microstructure and mechanical properties of the austenitic stainless steel 316L fabricated by gas metal arc additive manufacturing,» *Materials Science and Engineering: A*, vol. 703, pp. 567-577, 2017.
- [10] S. Davis, «Ferrite Morphology and Variations in Ferrite Content in Austenitic Stainless Steel Welds,» *WELDING RESEARCH, SUPPLEMENT TO THE WELDING JOURNAL*, 1981.
- [11] H. Inoue y T. Koseki, «Clarification of Solidification Behaviors in Austenitic Stainless Steels Based on Welding Process,» *NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT*, 2007.
- [12] C. Wang, T. Liu, P. Zhu, Y. H. Lu y T. Shoji, «Study on microstructure and tensile properties of 316L stainless steel,» *Materials Science and Engineering: A*, vol. 796, p. 140006, 2020.
- [13] C. R. Cunningham, J. Wang, V. Dhokia, A. Shrokani y S. T. Newman, «Characterisation of austenitic 316LSi stainless steel produced by wire arc additive manufacturing with interlayer

- cooling,» *Solid Freeform Fabrication 2019: Proceedings of the 30th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference*, 2019.
- [14] KUKA Roboter GmbH, Programación de robots 1, KUKA System Software 8, Augsburg, Alemania, 2013.
- [15] ASM International, «ASM Handbook Volume 9; Metallography and Microstructures,» 2004, p. 1597.
- [16] ASTM, «E8/E8M,» de *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, 2015, pp. 3-4.
- [17] V. T. Le, D. S. Mai, T. K. Doan y H. Paris, «Wire and arc additive manufacturing of 308L stainless steel components: Optimization of processing parameters and material properties,» *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 24, nº 4, pp. 1015-1026, 2021.
- [18] American Welding Society, «Specification for Bare Stainless Steel Welding Electrodes and Rods (AWS A5.9),» American Welding Society, 2022.

ANEXO 1: Programa utilizado en el Robot KUKA para la fabricación de placas con WAAM

#Transcripción del código tal cual se utilizó al 04/10/2023, terminada la primera placa de 18V, versión descriptiva (Algunos parámetros varían para las otras placas)
Esta parte define la herramienta, asegurándose de que comience apagada, y su movimiento lineal a 0.02 m/s, se definen 2 puntos, el punto inicial de la soldadura "Ptemp" y el punto "P_UP" que es la posición elevada de la torcha antes de comenzar.

INI

OUT 40 " State= FALSE

PTP P1 Vel= 100 % PDAT1 Tool[5]:torcha_metalurgia Base [0]

LIN P2 Vel=0.02 m/s CPDAT1 Tool[5]:torcha_metalurgia Base [0]

Ptemp = XP2

P_UP = XP1

Esta parte redefine "Ptemp" en cualquiera de los ejes x,y o z según sea necesario, se utiliza para el posicionamiento inicial de la torcha

Ptemp.Z = Ptemp.Z; + 4; + 2.5;+ 4 + 4.5

Ptemp.X = Ptemp.X

;Ptemp.y = Ptemp.y +10

BAS(#VEL_CP, 0.02)

lin Ptemp

**Se inicia un ciclo "FOR", que repetirá el programa por la cantidad de capas "N" requeridas para la fabricación, se ejecuta la "fun_01" que representa la función para un cordón, con argumentos de la función indicando las características del cordón, el proceso se repite, fabricando un total de 3 cordones por iteración, al terminar la capa se desplaza 5 mm en el eje z, comenzando la siguiente capa a esta altura luego de una espera de 10 segundos en la posición inicial. **

```
FOR N = 1 TO 40  
fun_01(Ptemp, 3.5, -130.0)
```

```
Ptemp.X = Ptemp.x + 3.5  
BAS(#VEL_CP, 0.02)  
LIN Ptemp
```

```
fun_01(Ptemp, 3.5, -130.0)
```

```
Ptemp.X = Ptemp.x + 3.5  
BAS(#VEL_CP, 0.02)  
;LIN Ptemp  
Ptemp = XP2  
Ptemp.z = Ptemp.z + 5  
;Ptemp.y = Ptemp.y + 10
```

```
LIN P_UP  
LIN Ptemp
```

****Se define la "fun_01", que ejecuta la construcción de un cordón, los argumentos de la función indican posición inicial "P0", desplazamiento en x "dx" (separación entre cordones) y separación en y "dy" (longitud del cordón), luego se declaran las posiciones y desplazamientos****

```
DEF fun_01(P0:IN, dx:IN, dy:IN)
```

```
decl E6POS P0
```

```
decl E6POS PX
```

```
decl REAL dx
```

```
decl REAL dy
```

****Se utiliza el punto auxiliar "PX", enciende la torcha y se desplaza en y a una velocidad de 0.005 m/s, luego apaga la herramienta, espera 2 segundos, sube en z 150 mm y se devuelve al punto inicial pero con el desplazamiento indicado en x para posicionarse para el próximo cordón, finalmente espera 45 segundos antes de terminar la función, que es el tiempo entre pasadas.****

```
PX = P0
```

```
;PX.y = PX.Y - 10
```

```
; LIN PX
```

```
PX.Y = P0.Y + dy
```

```
BAS(#VEL_CP,0.005)
```

```
OUT 40 " State= TRUE
```

```
BAS(#VEL_CP,0.005)
```

```
OUT 40 " State= FALSE
```

```
PX.Z = PX.Z + 150
```

```
BAS(#VEL_CP,2)
WAIT Time= 2 sec
lin PX
PULSE 40 " State= TRUE Time= 0.1 sec
PX.Y = P0.Y
PX.X = P0.X + dx
lin PX

WAIT Time= 30 sec
WAIT Time= 15 sec

END
```