

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

Integración y automatización de soldadura por fusión a una impresora 3D

Proyecto Técnico

Ricardo Andrés Veintimilla Vivanco

Edison Bonifaz PhD

Director de Trabajo de Titulación

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Quito, 12 de julio de 2019

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

Integración y automatización de soldadura por fusión a una impresora 3D

Ricardo Andrés Veintimilla Vivanco

Calificación:

Edison Bonifaz, PhD

Director del Trabajo de Titulación

Quito, 12 de julio de 2019

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante:

Nombre:

Ricardo Andrés Veintimilla Vivanco

Código de estudiante:

00108189

C. I.:

1713718870

Lugar, Fecha

Quito, 12 de julio de 2019

DEDICATORIA

Para mi madre y mi padre, por todo su apoyo, paciencia y amor. Para la Universidad, sus hermosos y fuertes años.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi madre y a mi padre por su apoyo, su paciencia, su paciencia, su resiliencia, y su amor, su paciencia, y su paciencia en especial. A Edison Bonifaz por su apoyo, su guía y su entusiasmo en el proyecto.

RESUMEN

El presente trabajo consistió en la integración y automatización del proceso de soldadura por fusión a una impresora 3D en la Universidad San Francisco de Quito. La impresora 3D permite realizar cordones de soldadura bajo las especificaciones de un usuario. El objetivo del trabajo es utilizar la impresora 3D Tronxy P802M implementando una máquina de soldadura para que realice cordones de soldadura MIG y automatizar su proceso para la investigación de soldadura y manufactura aditiva. El proyecto inició con el acople del mango de soldadura con la impresora 3D y se utilizó código G para la automatización. Se hicieron varias probetas de cordones y de manufactura aditiva hasta encontrar los parámetros adecuados para la creación de una buena suelda y una buena manufactura aditiva. Luego se accede a optimizar el proceso a partir de termocuplas con recolección de datos, para compararlos con datos teóricos de los ciclos térmicos. Se obtuvieron resultados de los ciclos térmicos experimentales por cada capa lo que brinda nueva información para las futuras manufacturas. Se logró generar probetas de varias capas de cordones de soldadura y la micrografía de dichas capas, se logró fabricar una pieza con la máquina. La máquina funciona correctamente y los parámetros de la suelda son óptimos para la manufactura aditiva. La máquina es un instrumento que abre las puertas a distintas investigaciones y proyectos para la universidad.

Palabras clave: Manufactura aditiva, automatización, soldadura, impresora 3D, WAAM.

ABSTRACT

The present work consisted in the integration and automation of the process of welding by fusion to a robotic arm at the University San Francisco de Quito. The 3D printer allows the welding process to be under user's specifications. The objective of the work is to use the Tronxy 3D printer P802M implementing a welding machine to make MIG welding beads and automate its process for welding research and additive manufacturing. The project began with the coupling of the welding handle with the 3D printer and G code was used for automation. Several test tubes of cordons and additive manufacture were made until finding the adequate parameters for the creation of a good solder and a good additive manufacture. Then we optimize the process with the data collection of a thermocouple, and compare the data with theoretical data of thermal cycles. Results of experimental thermal cycles were obtained for each layer, which provides new information for future manufacturing. It was possible to generate samples of several layers of weld beads and the micrography of said layers, it was possible to manufacture a piece with the machine. The machine works correctly and the parameters of welding are optimal for additive manufacturing. The machine is an instrument that opens the doors to different research and projects for the university.

Keywords: Additive manufacturing, automation, welding, 3D printer, WAAM.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--------------------------|-----------|
| RESUMEN | 5 |
| ABSTRACT | 6 |
| ÍNDICE DE FIGURAS | 9 |
| INTRODUCCIÓN | 11 |
| MÉTODOS | 16 |
| RESULTADOS | 30 |
| DISCUSIONES | 41 |
| CONCLUSIONES | 50 |
| BIBLIOGRAFÍA | 53 |
| Anexos | 55 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Impresora Tronxy 3D P802M | 17 |
| Figura 2: Diseño en Autodesk Inventor del acople de la antorcha..... | 18 |
| Figura 3: Acople de la antorcha..... | 20 |
| Figura 4: Ecuación de Rosenthal La imagen presenta la temperatura en el punto $T(x, y)$ donde sus coordenadas describen la distancia al punto de fusión (origen) y cómo se distribuye la temperatura a su alrededor a partir de la distancia. (Kou,2003)..... | 25 |
| Figura 5:Alabe diseñado en CAD | 29 |
| Figura 6: Pruebas de soldadura, donde se ajustaron los parámetros para un cordón profesional..... | 30 |
| Figura 7: Ensayo de Velocidades e inspección visual para un cordón apropiado..... | 31 |
| Figura 8: Ensayo de Manufactura Aditiva; el primer cordón cuenta con 5 cordones, el segundo con 4 cordones, el tercero con 3 cordones el cuarto con 2 cordones y el primero con uno. (En el fondo la máquina soldadora)..... | 32 |
| Figura 9: Probeta de Manufactura Aditiva de seis cordones y la medición de los ciclos térmicos..... | 33 |
| Figura 10: Ciclos térmicos de la probeta de seis cordones de soldadura a una distancia de 15 cm..... | 34 |
| Figura 11: Ciclo térmico del primer cordón de la probeta de seis cordones..... | 35 |
| Figura 12: Ciclo térmico del cuarto cordón de la probeta de seis cordones..... | 35 |
| Figura 13: Ciclo térmico del sexto cordón de la probeta de seis cordones..... | 36 |
| Figura 14: Micrografía 5x0.15, en la parte superior se ven los granos de la base, y como van cambiando con la suelda..... | 37 |
| Figura 15: Micrografía 5x0.15, en la parte superior la primera suelda y la inferior la | |

| | |
|--|----|
| segunda suelda..... | 37 |
| Figura 16: Micrografía 5x0.15, la unión entre la 3ra y 4ta suelda..... | 38 |
| Figura 17: Micrografía 5x0.15, la unión entre la 5ta y 6ta suelda..... | 38 |
| Figura 18: Micrografía 5x0.15, en la parte superior la unión entre la 5ta y 6ta suelda, y en la inferior las dendritas de la 6ta suelda..... | 39 |
| Figura 19: Micrografía 20x0.45, las dendritas de la 6ta suelda..... | 39 |
| Figura 20: Alabe Naca 6421 manufacturado por la máquina de manufactura aditiva..... | 40 |
| Figura 21: Alabe Naca 6421 y probetas de manufactura aditiva de 5 a 1 cordones..... | 41 |
| Figura 22: Probeta de 6 capas..... | 47 |
| Figura 23: Probeta de 6 capas..... | 47 |

INTRODUCCIÓN

En el desarrollo de la tecnología es esencial la fusión de distintas áreas ingenieriles, la cual permite la creación de técnicas que se vuelven fundamentales para la producción. La electrónica y la mecánica encajan juntos y permite un avance mucho más profundo y significativo. La automatización y la robótica son instrumentos fundamentales para el avance tecnológico del procesamiento de materiales. La unión de estas distintas áreas ha permitido un avance continuo e indispensable dentro de la industria productiva. La manufactura aditiva integra ambas ingenierías y está en pleno proceso de desarrollo, el mercado está demandando cada vez más su servicio y manufactura, el desarrollo de la manufactura aditiva incrementa.

La manufactura aditiva para el año 2018 está valorada por sus ingresos de \$9.3 mil millones, incluyendo manufactura, servicios, materiales, hardware y software. SmarTech Publishing en su reporte titulado *2019 Additive Manufacturing Market Outlook and Summary of Opportunities* presenta un resumen y pronóstico de todo el mercado de manufactura aditiva hasta el año 2027, incluye los segmentos más importantes como aeroespacial, salud, automotriz y servicio (Sher, 2018). Como el mercado ha incrementado y seguirá incrementando la demanda de manufactura aditiva dentro de los distintos segmentos de la industria, la competencia y la investigación de la manufactura aditiva sube. La tecnología debe cumplir con los requerimientos del mercado, y aunque ya se ha

desarrollado bastante la manufactura aditiva es simplemente un comienzo de todo lo que puede llegar a ser y cumplir.

Nuevas máquinas y nuevos conceptos buscan mejorar los diseños a un costo menor, mejorando la producción y la calidad de la manufactura. La industria busca continuamente mejorar la eficiencia de producción, la flexibilidad y calidad, con diseños de piezas y moldes más complejos. La manufactura aditiva permite el diseño y la optimización de geometrías y topologías, piezas más livianas, con mejores propiedades mecánicas, disminuyendo el tiempo de producción llevando del CAD-CAM directo a la producción. La manufactura tiene varios procesos y con la manufactura aditiva se acortan esos procesos y se logra un tiempo menor para el análisis de las propiedades de la pieza o el molde. El problema de la manufactura aditiva es que es más cara, no se puede producir en masa, y depende de los parámetros de la máquina y los parámetros de cómo se adhiere el material. La automatización y los sistemas computarizados para la manufactura aditiva son indispensables y durante este tiempo se ha desarrollado la optimización de geometrías y topologías, aprendizaje automatizado, y hay varias empresas dedicadas a la recopilación de datos para big data y machine learning.

La soldadura robotizada inició en la década de los 80's por la industria automotriz, sus aplicaciones con el tiempo se han desarrollado. Howard y Scott declaran que más de 60.000 robots son utilizados en la industria norteamericana y que forman parte del 20% del uso de robots dentro de la industria (Howard, Scott, 2005). La soldadura robotizada es utilizada en diferentes industrias y dentro de la producción con metales se ha vuelto muy

importante. Se debe tener en cuenta que la edad promedio de los soldadores en Australia y el Reino Unido es de 55 años, y que en los Estados Unidos de América es de 57 años (Le Quesne, 2017). Para el año 2020 habrá un déficit de 200,000 soldadores y para el año 2026 un déficit de 375,000 (AWS, 2018). A pesar de que la soldadura automatizada ya sea una sección importante de la industria con la baja de soldadores certificados, el mercado subirá la demanda de las herramientas automatizadas de soldadura.

El método más utilizado para la fijación de piezas metálicas es la soldadura por fusión. El problema de la soldadura es que requiere de habilidades profesionales y dentro de grandes producciones se necesita mucha mano de obra para mantener la calidad alta y la producción estable y continua. El proceso de soldadura es un proceso que debe ser manipulado con mucho cuidado y precisión, por lo tanto se ha desarrollado la automatización del proceso para brindar una mejor calidad a menor precio y una mejora en la producción. La soldadura robotizada es una máquina herramienta programable, la cual brinda la flexibilidad, adaptabilidad y precisión a las tareas. Se compone de una unidad mecánica y un controlador, se lo puede programar para distintos tipos de cordones los cuales son programados por el tipo de material, de suelda, y el procedimiento.

El presente proyecto se basa en la automatización, programación e implementación de una soldadora MIG a una impresora 3D Tronxy P802M, una máquina WAAM Wire and Arc Additive Manufacturing. La manufactura WAAM es una de las más importantes dentro de la manufactura aditiva ya que su deposición de material es más alta que el resto de manufactura aditiva de metal. Se basa en que se adhiere metal a partir de la fusión de un

alambre bajo el movimiento de un brazo robótico o máquina, que en este caso será una impresora 3D, y una soldadora MIG. La máquina tiene la intención de ser una herramienta para la manufactura aditiva, con cordones de soldadura gruesos para la fabricación de piezas, para la investigación de soldadura e investigación de manufactura aditiva. El robot deberá ser capaz de realizar cordones a partir de las especificaciones del usuario, para así brindar un proceso preciso y automatizado. Las variables que se manejarán dentro del estudio son el amperaje y la deposición de alambre de la máquina soldadora, la distancia entre la pistola y la base de la soldadura, las velocidades de avance, las rutas de suelda incluyendo la dirección de avance, el nivel de gas administrado por la máquina soldadora, y los tiempos de enfriamiento y distribución de calor dentro de la máquina. Para la futura optimización del proceso se medirán los ciclos térmicos de las probetas de manufactura aditiva y compararlos con ciclos térmicos teóricos. El proyecto se basa en desarrollar una máquina de manufactura aditiva a partir de la soldadura MIG, por ende también se toma en cuenta las dimensiones de los cordones, la transferencia de calor a la base, como la temperatura previa influye al próximo cordón, la eliminación de escoria, la programación del código G para que cumpla con las dimensiones del cordón y con la geometría de la máquina.

Se tiene en cuenta que la máquina de manufactura aditiva usa una soldadora MIG lo que es conveniente para piezas de tamaño más grande por el tamaño de sus cordones, se la podrá utilizar para crear cordones de soldadura los cuales serán los que compongan las capas de material para las piezas, entonces se estima la necesidad de procesos posteriores. Se harán las pruebas para la manufactura de una pieza donde se calculará el

tiempo de espera entre capas, la dirección de avance, y los parámetros necesarios para conseguir cordones profesionales con dimensiones específicas. Se desea extender la investigación al área de ingeniería de materiales, se tomarán probetas de manufactura aditiva que consiste en capas de varios cordones de soldadura con la intención de observar la micrografía.

Una vez automatizado el proceso de soldadura se logra abrir las puertas para distintas aplicaciones como manufactura aditiva, corte y tratamiento superficial. También dentro del área de ingeniería de materiales, su observación microscópica, la generación de probetas para proyectos de manufactura aditiva y procesamiento de materiales, investigación dentro del área de soldadura, machine learning, investigación de transferencia de calor, desarrollo de programas para la optimización de la geometría y topología para la optimización de las propiedades de la pieza como bajar su peso y aumentar sus capacidades mecánicas. Es el primer paso para la manufactura aditiva de metales de la universidad y abre las puertas a muchos proyectos que demanda el mercado.

MÉTODOS

La impresora 3D Tronxy P802M es vendida con el propósito de ser armada y se venden las piezas separadas y una guía. La impresora cuenta con 4 stepper motors Nema17, uno está colocado para que la base se mueva en la dirección Y, hay dos a los lados con tornillos infinitos que lo mueven en dirección Z al acople de la pistola, y hay uno que sube por el tornillo infinito que está colocado horizontalmente al acople de la pistola que lo mueve en dirección X. Cuenta con un switch en las direcciones X y Y que paran al motor y calculan el punto cero al ser activados cuando la base móvil y el acople llegan a su tope. Cuenta con un sensor de proximidad activado con la base metálica. Cuenta con un panel de control con conexión directa con el computador y una llanura para un micro SD, el cual lee código G y lee los comandos para las distintas herramientas dentro de la impresora como ventilador para el difusor de plástico. Finalmente tiene una pantalla LCD donde se puede controlar la impresora.

La impresora 3D Tronxy P802M fue escogida por su DIY o bricolaje, ya que se la adquiere desarmada y de esta manera es más fácil el diseño e implementación del acople para la pistola de soldadura, de la misma manera es más fácil la implementación de la base metálica donde se va a soldar, sus partes son más fáciles de replicar para así cambiar su material y permite el diseño de sus partes para una mejora continua. Los dos motores que mueven el acople tienen la capacidad de mover el peso de la pistola por el eje Z, de igual

manera la base metálica es movida sin problemas por el eje Y. El panel de control, al leer una tarjeta micro SD, permite que pueda estar en aislamiento la máquina ya que es necesario por la soldadura; se tendría que encontrar una manera de proteger la computadora y un cable más largo de lo normal. Que la máquina pueda leer código G permite la programación de las piezas y los cordones con facilidad, también el cambio de ruta del avance y las velocidades de avance son definidas claramente con código G, el tiempo de espera entre cordones es fácilmente programable, y las varias capas de soldadura también se logra programar con facilidad ya que se programa o se usa CAD para diseñar líneas que den forma y que son fácilmente programables a código G.

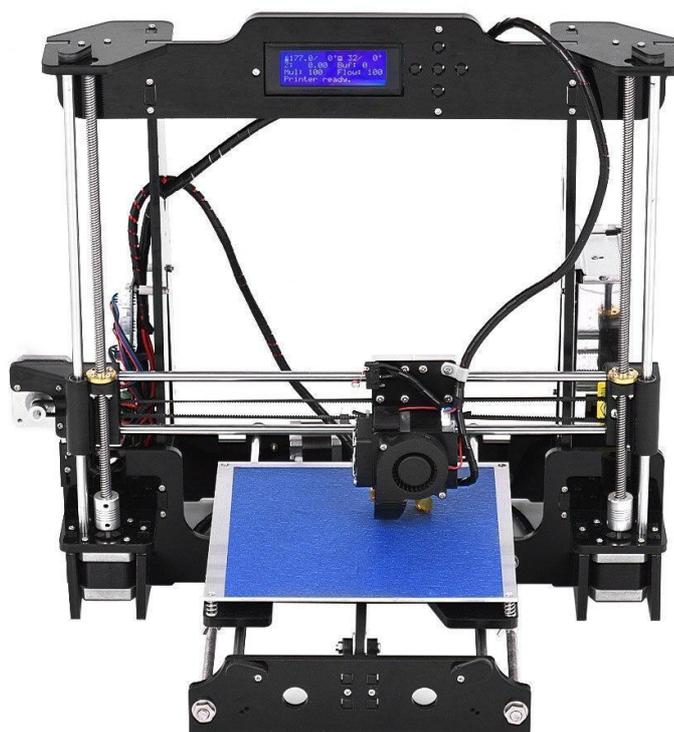


Figura 1: Impresora Tronxy 3D P802M

Se utiliza la máquina soldadora Gala Gar GALA MIG 1810 ya que la alimentación del

alambre y la válvula de salida del gas protector son esenciales para lograr un movimiento continuo y automatizado. Se inicia con la construcción de una abrazadera que logre acoplar a la antorcha con una impresora 3D. Los parámetros para el diseño fueron escogidos para que la funcionalidad de la máquina sea óptima, no tenga problemas con la movilidad de la antorcha, la antorcha se mantenga estable, se pueda medir con facilidad la distancia de la antorcha con la base, y no tenga problemas con las chispas ocasionadas por la fusión. Se desarrolla el diseño a partir de la impresora Tronxy, para que se acople a la cadena del motor del eje X, y se acople a los dos ejes metálicos, haciendo un intercambio entre el difusor de plástico por el acople. Se decidieron los materiales del acople para su manufactura, luego los procesos de manufactura y finalmente la pintura. Se decidió madera para el cubo del tope que sostendrá la antorcha, por su fácil manufactura, el tiempo de manufactura, el peso, y el costo. La otra opción era grilón, pero es más caro, su tiempo de manufactura es más largo, su manufactura es más complicada y la densidad es mayor. La abrazadera se diseñó en Autodesk Inventor, se tiene una fotografía del diseño a continuación y los planos para la manufactura están dentro de los anexos. Se muestra a continuación el diseño en Autodesk Inventor. Los planos se encuentran en el Anexo A.

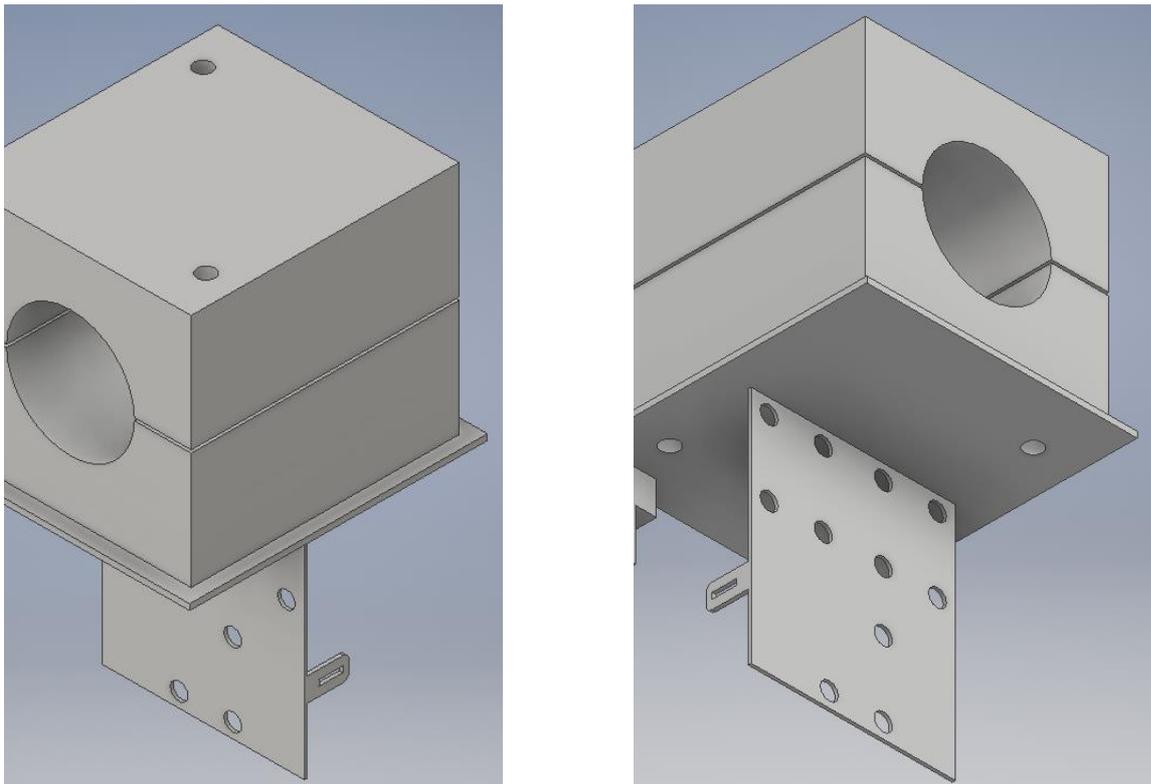


Figura 2: Diseño en Autodesk Inventor del acople de la antorcha

Se trabajó en un cubo de madera de las dimensiones del plano (Anexo A) se taladró con una secuencia de brocas que crecían de ancho para no quemar la madera del ancho de la antorcha MIG, el hueco del centro y también los huecos diagonales para sostenerlos a la base, finalmente se cortó en la mitad para crear un tipo de agarradera. La base del cubo y la lámina que sostiene los rodamientos axiales para los ejes X fueron hechos de metal y trabajados con el taladro de precisión, ambas partes fueron soldadas ya que es la mejor forma de junta. Se extendió del mismo metal las agarraderas para la cadena que mueve el acople por el eje X. Se agregó una pieza de plástico que se juntó con silicona donde se junta el switch del tope del eje X. El acople se muestra a continuación.

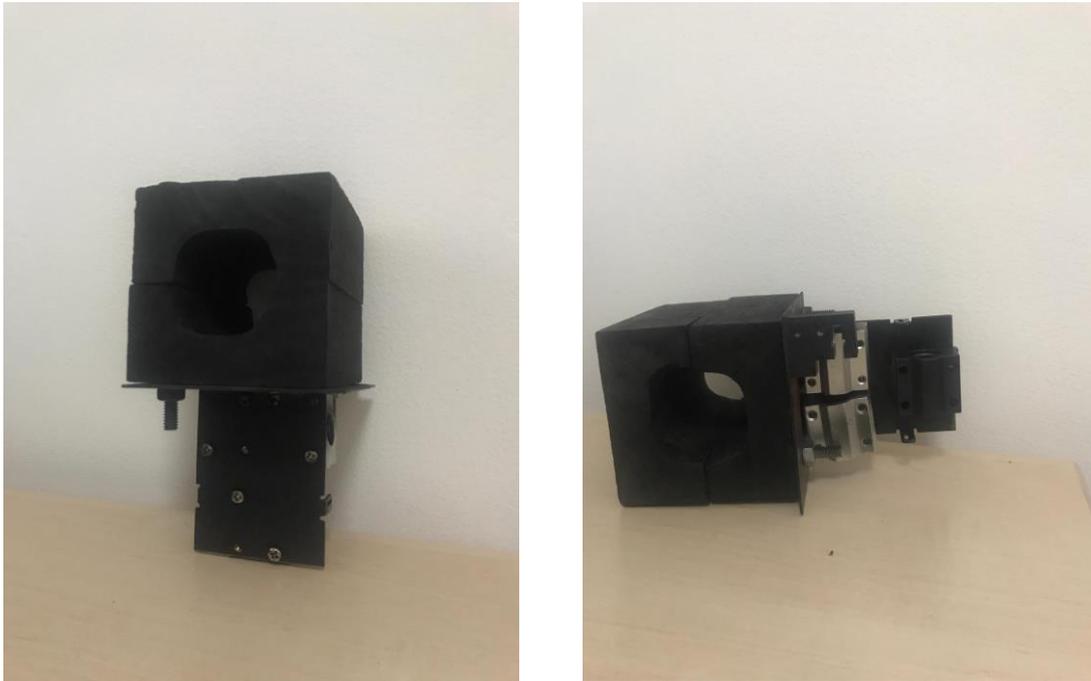


Figura 3: Acople de la antorcha

El acople es unido con 3 rodamientos axiales, los cuales son los que permiten el desplazamiento del acople por el eje X. El motor del eje X manipula una cadena la cual sostiene al acople por ambos lados y se encuentra al otro lado del motor una rueda que permite su desplazamiento. Cuando el acople se encuentra ya colocado en el eje X se agarra la cadena con alambre para que se mantenga fija, y se hacen los respectivos ensayos de movimiento con la impresora 3D la cual permite aflojar o ajustar cualquier pieza. Se necesita automatizar la antorcha MIG para que suelde a distancia o justamente cuando se lo pida la impresora. La antorcha MIG tiene una palanca mecánica que al ser apretada con el mango conecta el corto circuito, deposita alambre, y libera gas para la suelta, bajo esta palanca se encuentra un switch de encendido y apagado, entonces se desarmó la palanca y

se sacó el switch. Este switch es el que controla la suelda, por razones de riesgo y de control de calidad de la suelda se decidió extender un cable con una longitud de 3m y así controlarlo a la distancia. Ahora con la antorcha y el acople se necesitan unir, entonces al acople se le afloja para que entre la antorcha y se ajustan los pernos, el cable de la antorcha es colocado en una posición superior a la de la impresora para que el peso sea distribuido de una mejor manera y no sostenga el acople el peso del cable. En la sala de soldadura de la USFQ la parte de atrás de la mesa guarda un extractor de aire y se colocó el cable con el extractor y así se lo sostuvo a una posición más alta que la de la impresora, y se distribuyó el peso.

Las razones de volverle manual al proceso de suelda y no automatizarlo por completo son por el riesgo de que se suelde cuando no se deba soldar, la máquina se está recién probando y no sabemos cómo van a responder los parámetros ante el operar la antorcha, también se debe trabajar con la suelda y retirar la escoria lo cual produce un cambio en la exactitud de la posición estimada por la impresora. También se tuvo en cuenta que entre sueldas no siempre se va a generar el mismo ancho de cordón entonces la programación no siempre va a estar perfecta frente a la altura de la antorcha. Existe el riesgo de que por alguna situación ajena se necesite suspender la suelda, se podría hacer un botón de emergencia pero el control humano es más seguro con sólo soltar el switch. Además de que la soldadura es peligrosa y podría pasar algo con la máquina, se necesita del control humano.

Una vez de que el acople y la antorcha ya estén en funcionamiento se miden las limitaciones de las dimensiones de espacio ya que la antorcha tiene una extensión extra de

12 cm. Antes de hacer las probetas se requiere hacer ensayos de los parámetros de la suelda para obtener cordones anchos y de calidad profesional. Se controla la velocidad de la alimentación del electrodo el cual es un ER 70 S-6, el flujo del gas protector CO₂ aparte la dirección de avance, el voltaje y amperaje; en el libro *Catálogo de electrodos comunes, especiales y gases para corte y soldadura* desarrollado por AGA en 2002 se encuentran los parámetros para un cordón óptimo para el electrodo ER 70 S-6. Basándose en la norma AWS con un milímetro de diámetro se recomienda el gas de protección CO₂ en un flujo de 8-15 lt/min, un amperaje de 90-110 A, un voltaje de 16-22 V y una velocidad de alimentación de alambre 310-630 cm/min. Se hacen las pruebas en planchas de acero A36 de 6mm de espesor, dichas planchas fueron agujereadas en las esquinas para colocarlo en la base móvil del eje Y, entre la base de la impresora y la base de la suelda se colocó fibra de vidrio para aislar la temperatura de la impresora.

Los parámetros ajustados fueron el de la altura de la antorcha a la base, la corriente y el voltaje, la deposición de material. Se encontró que el problema más grande es que la velocidad de avance es muy rápida, se estaba utilizando la velocidad por defecto de la impresora. Una vez ajustados los parámetros dichos en el libro *Catálogo de electrodos comunes, especiales y gases para corte y soldadura* se programa en código G una serie de cordones con distintas velocidades de avance, que van disminuyendo de los 1000 hasta los 150 mm/min. Según Janapétov en su libro *Soldadura y corte de metales* en la soldadura de múltiples capas se busca que la capa inferior no sobrepase los 4-5 mm de espesor ya que si se sobrepasa no llega a una fusión ideal. El metal base presenta también una ecuación que relaciona el área transversal del cordón con el diámetro del electrodo (1977).

$$\sigma_1 = (6 - 8) \sigma \quad (1)$$

Se tuvo en cuenta que se debía buscar un cordón con características profesionales las cuales fueron bajo un control visual detallado por la AWS en *Guía para la Inspección Visual de Soldaduras AWS B1.1* donde especifica que se deben evitar fisuras, discontinuidades, grietas, falta de fusión, porosidades, socavación, inclusión de escoria, sobremonta excesiva, y como se describió previamente se requiere de un espesor de 4 a 5 mm porque se busca encontrar un cordón base para múltiples pasadas ya que el proyecto se enfoca en la manufactura aditiva. El ensayo se desarrolló a partir de un programa con código G donde del lado derecho está la velocidad mayor y disminuye hacia el izquierdo hasta encontrar la velocidad con las características de una buena suelda.

Una vez encontrada la velocidad y los parámetros que constituyen a un cordón de suelda descrito por Janapétov para múltiples pasadas y superada la inspección visual, se utilizan las características de dicha suelda para programar un ensayo de pasadas múltiples y un ensayo de una pieza a partir de varias capas de suelda. El enfoque aquí es que una vez que se hayan hecho cordones de varias capas y se han encontrado las nuevas variables se logra programar y definir con mayor claridad el programa de la pieza a soldar. Se inicia el programa con un cordón simple de 15 cm, se tiene un tiempo de espera y se suelda otro cordón al lado del anterior de 15 cm igual pero con dos capas, luego al lado otro de 3 capas, otro de 4 capas y finalmente uno de 5 capas. Entre cada cordón de suelda se le hace esperar 5 minutos a la máquina. La soldadura MIG no es común soldar de atrás hacia adelante sino

de adelante hacia atrás, o de un lado a otro, por ende se programó para que suelde de adelante hacia atrás.

Una vez que ya se hayan tenido ensayos exitosos, se procede a hacer una probeta de 6 capas de soldadura. Es necesario tener retroalimentación del proceso, por ello se hará el análisis de ciclos térmicos gracias a la colocación de termocuplas sobre la base de la probeta. La termocupla se colocó en el lado opuesto a donde se encuentra la pinza de la suelda, por la geometría de la impresora no es posible colocar la termocupla dentro de la base de metal, ya que se mueve la base constantemente y tiene la base móvil de la impresora debajo, se la coloca con una cinta de embalaje que tiene una resistencia de temperatura hasta los 300 °C. La termocupla es una termocupla tipo K con recubrimientos cerámicos, la cual permite la lectura de temperaturas altas, y se utiliza el data logger EasyLog, que se programó para que recopile información cada segundo. El set permitirá extraer información de la base de la placa y se recolectarán los datos para hacer un seguimiento y optimizar el proceso.

Se analizó la transferencia de calor de una placa de acero A36 siendo soldada que es la misma que la base de donde suelda la máquina, la cual tiene difusividad térmica de 9.1×10^{-6} (m²/s), capacidad volumétrica térmica de 4.5×10^6 (J/m³K), conductividad térmica de 41 (J/msK), con una temperatura de fusión de 1540 K.. Se entrega un amperaje de 90-110 A y un voltaje de 16-22 V ya que estas son las utilizadas. GMAW tiene una eficiencia del 80%-95% (Giachino, 1997), por eso utilizaremos una eficiencia del 87.5%. Se utiliza una velocidad de avance de 150 mm/min que es la que se encontró en las pruebas.

El análisis de temperaturas se basa en un modelo matemático que describe la transferencia de calor producida por la soldadura, en el proyecto será utilizado de Sindo Kou, *Welding Metallurgy*, la ecuación de Rosenthal. La siguiente figura muestra las variables y la geometría de Rosenthal, la ecuación entrega la temperatura en cualquier lugar de la superficie (x, y) , donde se encontrarán las termocupas, con respecto al arco $(0, 0)$. Se desarrolló la ecuación para que nos entregue el ciclo térmico dentro de una pasada, en el punto especificado (termocupla). Se tiene en cuenta que la ecuación sólo toma en cuenta la geometría por donde pasa la antorcha, por donde está posicionada la transferencia de calor, y analiza con toda la geometría de la placa, entonces la placa mide 22 cm, pero la suelda es de 15 cm, la ecuación solo mide los 15 cm por donde pasa y no analiza la distribución de calor por el resto de la placa. Para tener un mejor entendimiento se puede ver la imagen de Rosenthal y la soldadura.

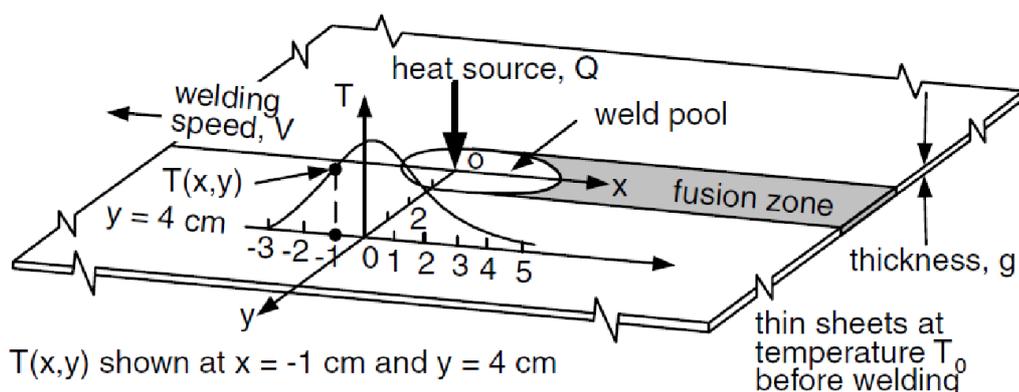


Figura 4: Ecuación de Rosenthal La imagen presenta la temperatura en el punto $T(x, y)$ donde sus coordenadas describen la distancia al punto de fusión (origen) y cómo se

distribuye la temperatura a su alrededor a partir de la distancia. (Kou, 2003)

$$\frac{2T(T_0 - T_0)}{g} = \frac{2kQ}{V} \left(\frac{z}{2\alpha}\right) Y_0\left(\frac{z}{2\alpha}\right) \quad (2)$$

Dónde: T=temperatura

T_0 = temperatura de la pieza antes de la soldadura

k=conductividad térmica

g=espesor de la pieza

Q= calor transferido a la pieza

V= velocidad de avance

α = difusividad térmica, $k/\rho C$ densidad y calor específico respectivamente

Y_0 = función de Bessel modificada de segundo tipo y orden cero con argumento $z=$

$$\frac{2kQ}{V}$$

$$z = \frac{z}{2\alpha} \quad (3)$$

n= la eficiencia de la fuente

E= es el voltaje

I= es la corriente

Se tiene un ensayo experimental donde se han recopilado los datos de la temperatura con una probeta de 15 cm de 6 capas, donde se esperó cerca de 20 minutos entre cada capa. Gustavo Tapia hizo una tesis alemana a esta, donde se utilizó un brazo robótico en vez de una impresora 3D, y no tuvo el enfoque de la manufactura aditiva, de hacer una máquina WAAM. La tesis actual se basa y se guía en la tesis de Tapia, se hizo el mismo análisis de datos de temperatura y utilizó varias termocuplas, y las comparó con Rosenthal. Se debe tener en cuenta que Rosenthal tiene muchas fallas y que su análisis nos puede dar un estimado pero no uno de fiar concretamente, nos puede ayudar con probetas futuras para estimar ciertas temperaturas pero no el tiempo real de un enfriamiento ya que no es considerado. Ahora con los parámetros se analiza teóricamente con la ecuación de Rosenthal y se genera una simulación de lo experimental, donde se encontrará una comparación entre ambas. Se utiliza el código de MatLab creado por Tapia para hacer el análisis de Rosenthal, el cual define la distancia, la velocidad y el tiempo uniendo sus variables y permite visualizar la suelda de una mejor manera (Anexo B, 2003). Lo que nos da el análisis de temperaturas es una mejor visión de cómo se puede soldar de aquí en adelante para varias capas, a qué temperatura se encuentra la base antes de la próxima suelda, ya que el precalentamiento es importante e influye en las propiedades del material una vez terminado. Nos ayuda también a controlar la transferencia de calor a la impresora 3D, ya que se debe cuidar de los motores y las cadenas ya que podría afectarles una temperatura alta, y se tomó precaución con la fibra de vidrio pero no es suficiente. Entonces por el riesgo de que la máquina se dañe, se hace un análisis de temperaturas que ayuda para las utilizations futuras al tener un parámetro de cómo usar con precaución.

Ahora con la probeta de manufactura aditiva que tiene 6 capas de soldadura se procede a observar sus granos con el microscopio óptico. Se procede a observar cada capa de soldadura, se desea identificar cada capa a partir de sus granos y observar como se ha comportado el material bajo las condiciones de varias soldaduras una sobre otra. De esta manera se puede inferir propiedades mecánicas del metal, que clase de post-procesamiento se necesita, y si existe mucha generación de bainita, para estimar los esfuerzos residuales.

Con la máquina ya lista con todos los parámetros se procede a diseñar una pieza a fabricar, la meta es tener una pieza en código G que pueda ser manufacturada por la impresora. Se procede a dibujar en AutoCad un álabe escogido por su forma y su grosor, modelo NACA 6421, que permite a la máquina demostrar más detalles que otro álabe. Una vez dibujado en CAD se lo importa al programa Repetier donde lo convierte en código G, luego se busca cambiar y definir la trayectoria de la suelda de adelante hacia atrás para que la antorcha no sea estorbada por la suelda. Se tiene en cuenta que ya que la suelda se compone de una sola línea, se programa solo la línea de contorno del álabe, luego la misma línea se programa pero 4 mm más arriba y así sucesivamente hasta terminar las 6 capas que componen la pieza.

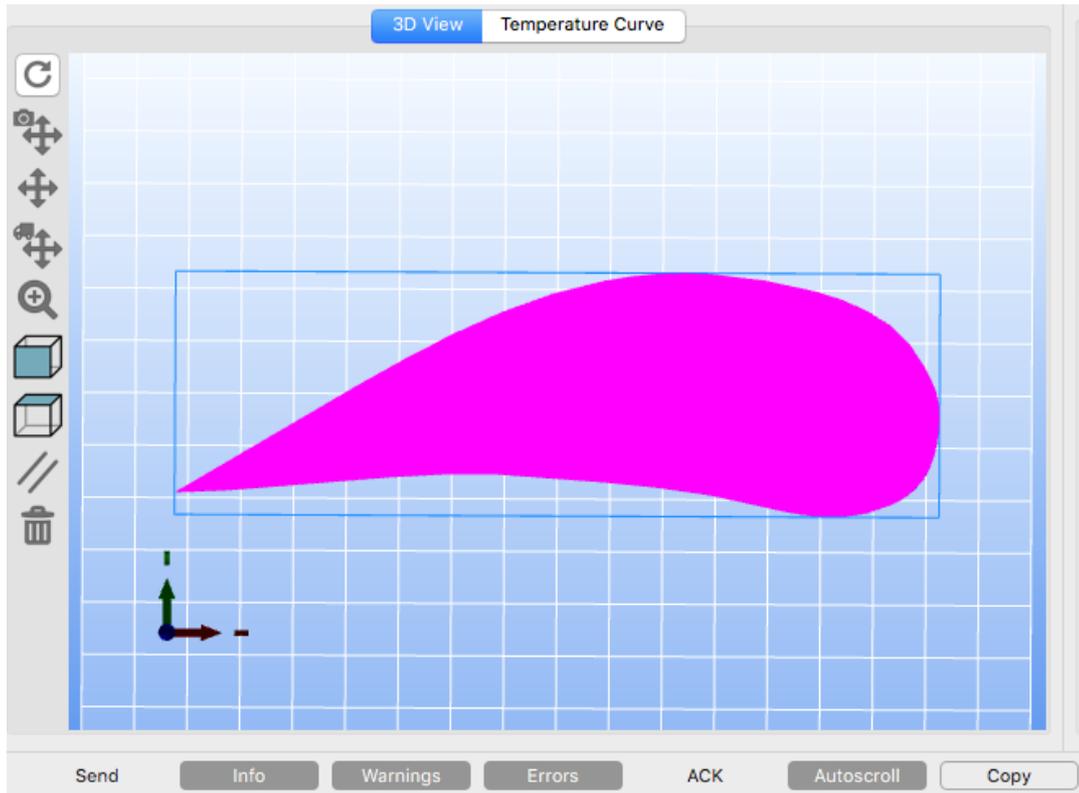


Figura 5: Alabe diseñado en CAD

RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de las primeras sueldas de la máquina donde se ajustaron los parámetros definidos por Janapétov para una buena suelda



Figura 6: Pruebas de soldadura, donde se ajustaron los parámetros para un cordón profesional.

Una vez que ya se encontraron los parámetros y la altura correcta, se corre el programa donde suelda varios cordones con distintas velocidades hasta encontrar en la última con una velocidad de 150 mm/min o 2.5 mm/s, donde gracias a la inspección visual fue aprobada para las siguientes pruebas. Con esta velocidad se mantendrá para el resto

del proyecto ya que coincide con los 4 a 5 mm de espesor requeridos para la manufactura aditiva.



Figura 7: Ensayo de Velocidades e inspección visual para un cordón apropiado

Se ha desarrollado varias probetas que consisten en una placa con varios cordones, estos cordones serán analizados a partir de la norma de la AWS en *Guía para la Inspección Visual de Soldaduras AWS* que permite calificar a la soldadura. La placa tiene las medidas de 22 cm por 22 cm, donde dará el espacio para 5 cordones, se inicia con un cordón luego 2 cordones, 3 cordones, 4 cordones y finalmente 5 cordones. Este ensayo de manufactura aditiva con cordones se muestra a continuación.



Figura 8: Ensayo de Manufactura Aditiva; el primer cordón cuenta con 5 cordones, el segundo con 4 cordones, el tercero con 3 cordones el cuarto con 2 cordones y el primero con uno. (En el fondo la máquina soldadora)

Se procede con una sola probeta con las variables definidas para todos los cordones y se toma el tiempo de calentamiento y enfriamiento donde se coloca la termocupla en la base al lado de la probeta y se miden los ciclos térmicos del punto donde se encuentra la termocupla. Aquí es donde se procede a encontrar las variables óptimas para los cordones. Se utilizan estos resultados y estos cambios de variables para continuar con la última parte.

Estas probetas permiten cambiar las variables que fueron explicadas en la metodología, hasta llegar a un cordón bien hecho y aprobado por la norma AWS.



Figura 9: Probeta de Manufactura Aditiva de seis cordones y la medición de los ciclos térmicos

Con este ensayo se calcularon los ciclos térmicos a una distancia de 15 cm del cordón de solda y se presentan a continuación.

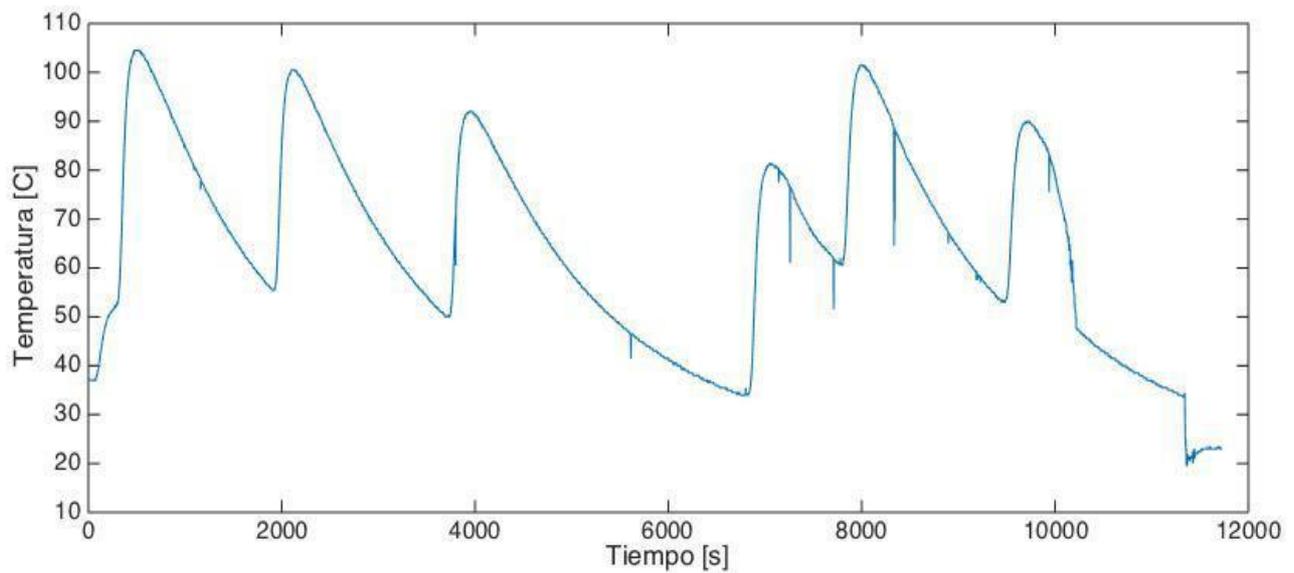


Figura 10: Ciclos térmicos de la probeta de seis cordones de soldadura a una distancia de 15 cm

Se generó un código en MatLab el cual describe la soldadura y el tiempo de la pasada. La ecuación está descrita por la posición del nodo con respecto al arco. Por lo cual se generó el tiempo con respecto al transcurso; y el transcurso con respecto al tiempo, utilizando la velocidad. El código tiene como objetivo encontrar las temperaturas en el lugar de la termocupla a partir de cada cordón, a continuación se muestran las simulaciones de Rosenthal para la probeta, donde fue escogida la temperatura de inicio igual que en la probeta.

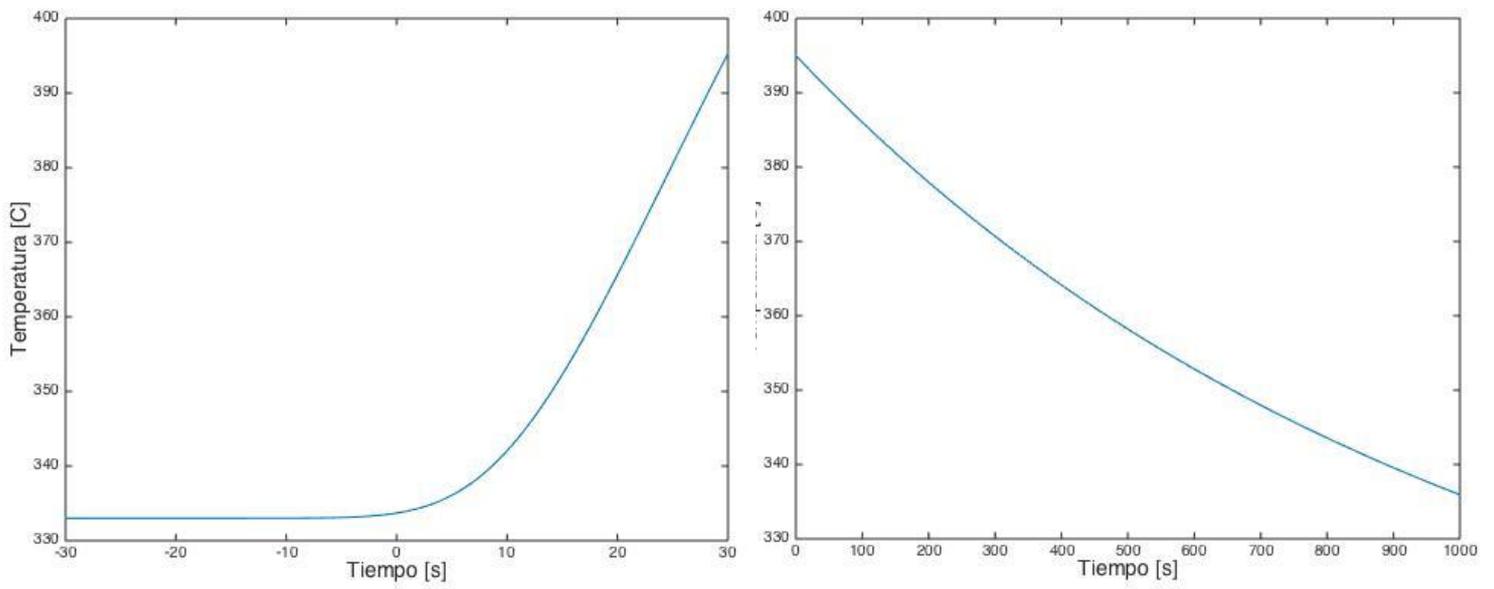


Figura 11: Ciclo térmico del primer cordón de la probeta de seis cordones

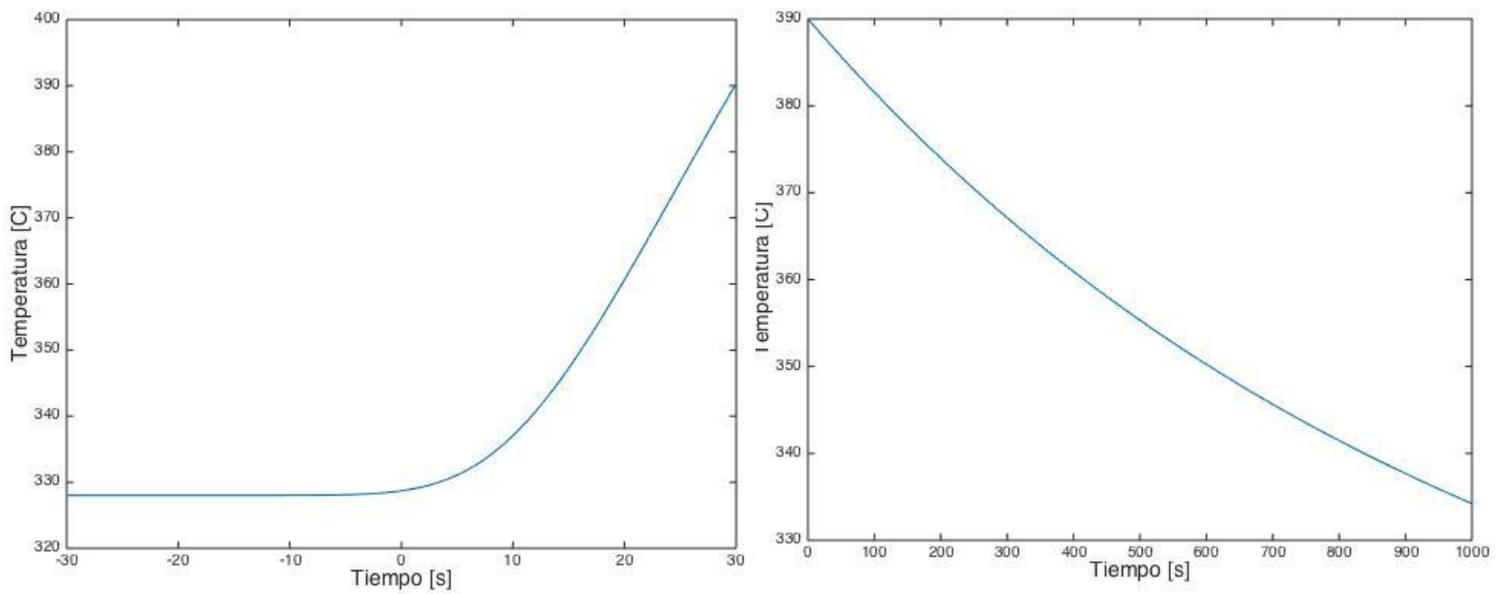


Figura 12: Ciclo térmico del cuarto cordón de la probeta de seis cordones

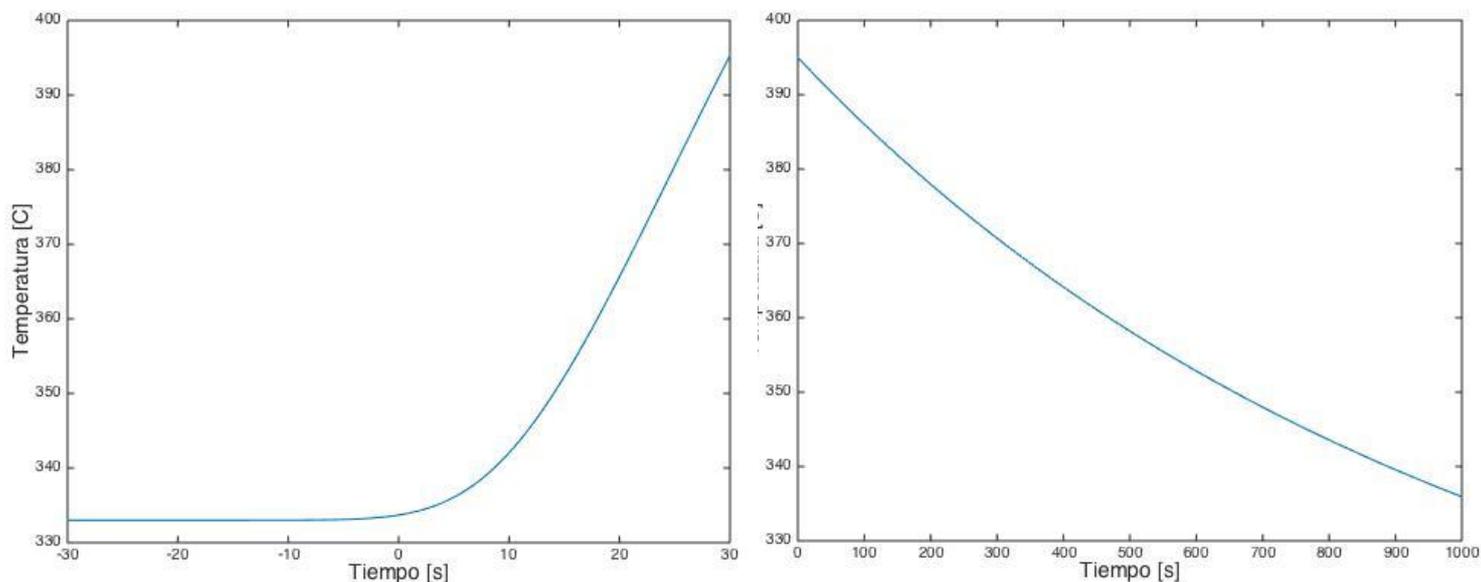


Figura 13: Ciclo térmico del sexto cordón de la probeta de seis cordones

Luego se corta la probeta de 6 cordones y se construye con baquelita una muestra donde se observan los granos de cada capa en el microscopio óptico y cómo la diferencia de los tratamientos térmicos y las fusiones hicieron un impacto en los granos. Se cortó en frío con una cortadora a precisión IsoMet 1000 que utiliza solo la fuerza de la gravedad para tener una deformación mínima y que no interrumpa con la micrografía y no cambie los granos de la probeta, está construido para hacer corte de materiales delicados. Se colocó en el microscopio óptico se utilizaron los lentes 5 x 0.15 y 20 x 0.45 que tienen un aumento de 5 y 20 se tomaron las siguientes fotografías.



Figura 14: Micrografía 5x0.15, en la parte superior la base, y como van cambiando con la suelda.

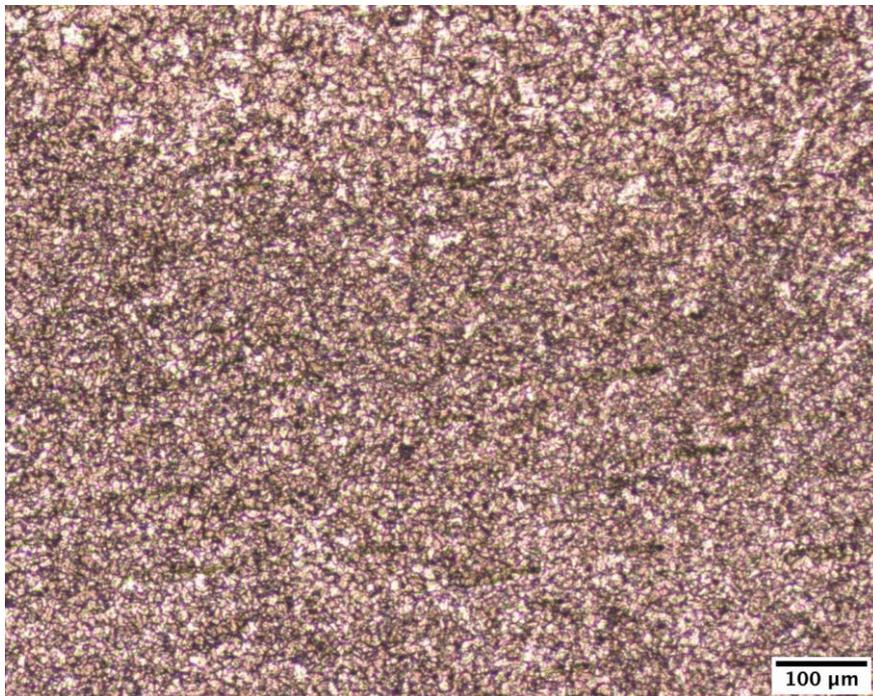


Figura 15: Micrografía 5x0.15, en la parte superior la primera suelda y la inferior la segunda suelda.



Figura 16: Micrografía 5x0.15, la unión entre la 3ra y 4ta suelda.

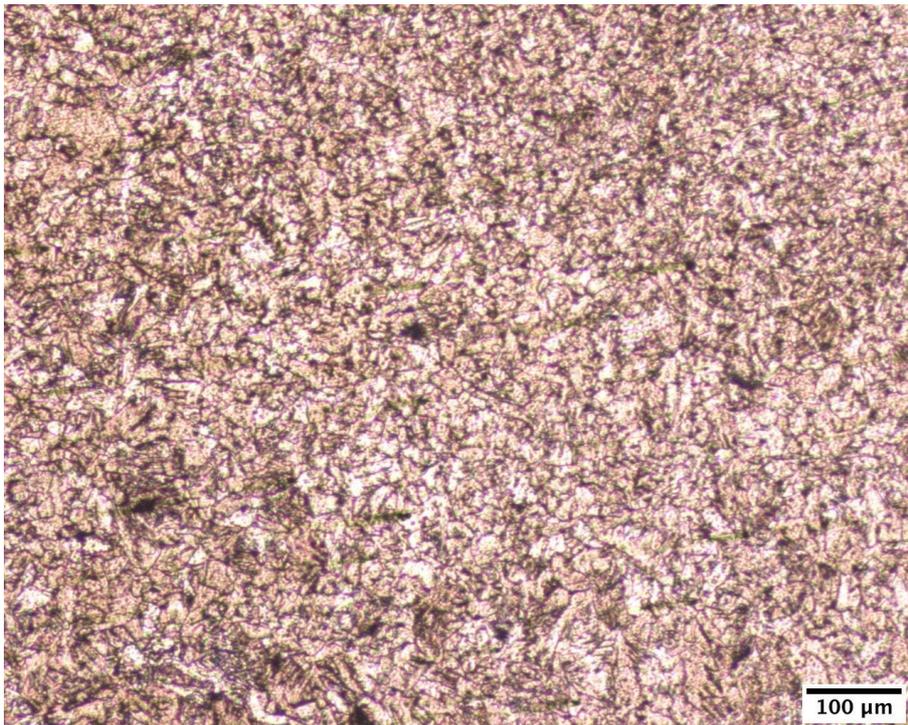


Figura 17: Micrografía 5x0.15, la unión entre la 5ta y 6ta suelda.

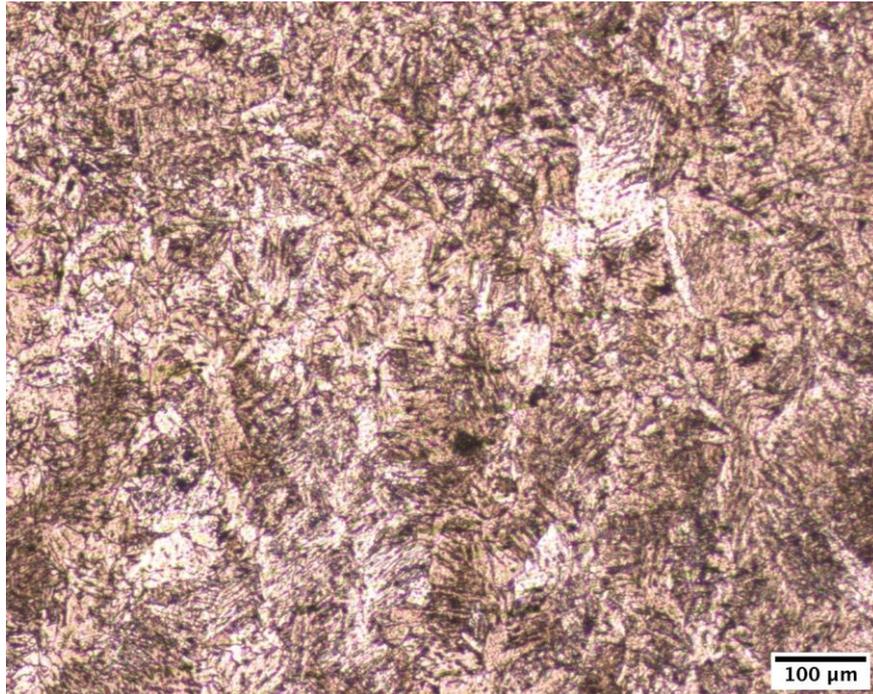


Figura 18: Micrografía 5x0.15, en la parte superior la unión entre la 5ta y 6ta suelda, y en la inferior las dendritas de la 6ta suelda.

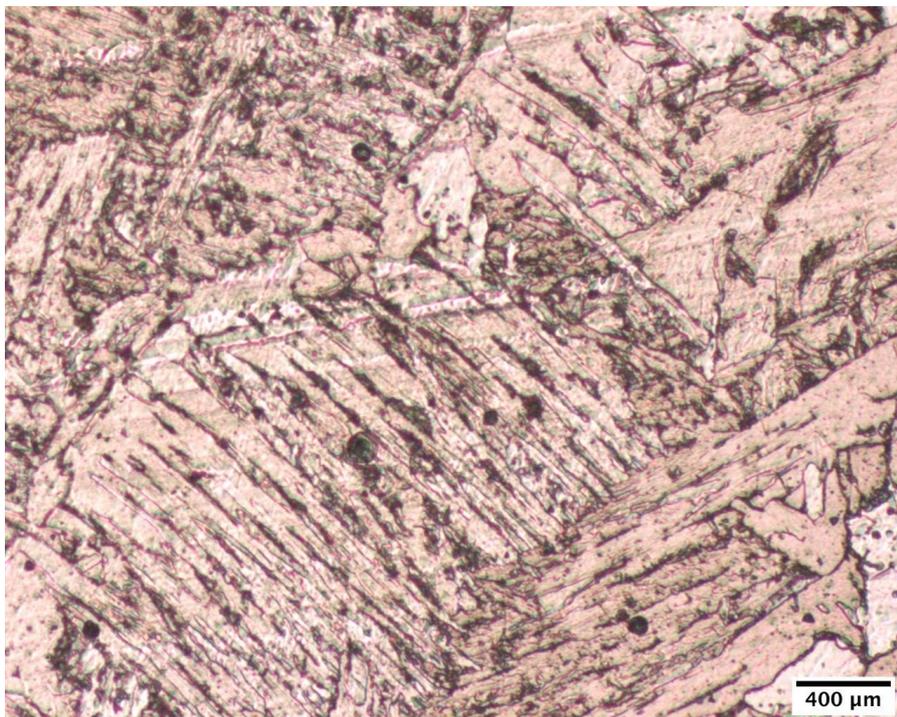


Figura 19: Micrografía 20x0.45, las dendritas de la 6ta suelda.

En la última capa en la sexta capa se hicieron mediciones de los brazos secundarios dendríticos y a partir de la magnificación de 20x se calculó la longitud de 2.5464, y otro de 3.565 con dendritas de 14 a 10 por brazo. Se utilizó el programa ImageJ que permitió hacer la medidas correspondientes y sacar la información necesaria. Finalmente se concluye con la pieza manufacturada por la máquina, es un álabe modelo NACA 6421, desarrollado con 6 capas de suelda el cual se encuentra a continuación.



Figura 20: Alabe Naca 6421 manufacturado por la máquina de manufactura aditiva.



Figura 21: Alabe Naca 6421 y probetas de manufactura aditiva de 5 a 1 cordones.

DISCUSIONES

Se inició con la construcción de la impresora 3D, y el acople de la antorcha, una vez que la máquina ya ha funcionado se puede definir que las piezas de la impresora siendo de acrílico no son óptimos para el propósito de la máquina. Si fuesen de metal soportan mejor los cambios de temperatura y estarían mejor preparados para resistir las chispas que son ocasionadas por la suelda, pero por la misma razón de ser metálicos se debería ingeniar un sistema de aislamiento eléctrico para no tener problemas. El hecho de que sea acrílico aporta al cuidado del panel de control y la fuente de poder. Existen piezas claves que podrían ayudar como las estructuras que sostienen a la antorcha y la base de acrílico también podría ser cambiada para no tener inconvenientes ya que el acrílico tiene un punto de fusión de cerca de los 220 °C. La máquina fue escogida por construcción, ya que viene en partes, lo que permite dar al ingeniero o estudiante el manual de la construcción de la máquina, y con las piezas sueltas se pueden diseñar mejoras continuas, una de ellas es la de usar de molde para cambiar de material a uno resistente a la temperatura y que soporte mejor a la antorcha. Se encuentra también el acople que fue construido de madera y es un soporte macizo y pesado, que se podría cambiar a un tubo metálico partido en dos que tendría el mismo funcionamiento pero sería más liviano y tendría resistencia a las salpicaduras, chispas de la suelda y temperatura, pero se debe tener en cuenta que la antorcha necesita estabilidad y normalmente tiene una fuerza que inclina hacia adelante que si es corregido por el acople de madera.

Los resultados demuestran que el tiempo que se demora el robot es mayor al de un soldador, y que las características de los cordones son mejores y continuos dentro del robot. Los cordones producidos por un soldador no tienen una altura constante, la velocidad de avance tampoco es continua y tampoco llega a la velocidad requerida. Las probetas analizadas demuestran que la calidad y el tiempo de producción es mejor y más efectivo automatizado. También se debe tener en cuenta que el robot sólo opera a partir de las especificaciones programadas, una vez que se mueva la pieza o se desconfigure el robot no podrá soldar bien. Los cordones al principio presentaron dificultades ya que la velocidad era muy elevada y no llegaba a hacer fusión la base pero con el ensayo de velocidades se encontró que la velocidad de 2.5 m/s es la velocidad óptima para la suelda de manufactura aditiva que consiste en 4 a 5 mm de espesor (Figura 7). El encontrar la altura ideal es muy importante, ya que esta altura fue igualmente utilizada para las probetas de “additive manufacturing”, la altura define la suelda, su composición, su forma y su efectividad. Varias pruebas fallaron por la altura y se crearon muchas chispas y salpicaduras que podrían haber dañado el resto de las capas, por ende se aisló el sensor de altura del eje Z, donde al topar con un metal le entrega la información al panel de control, al hacerlo manual se logra entregar el control al usuario para que defina la altura a partir de su criterio. Se optimizaron las variables según Janapétov para el electrodo ER 70 S-6 y finalmente los cordones cumplen con los estándares profesionales. Bajo la norma de la AWS de la inspección visual los cordones fueron aprobados, no se encontraron discontinuidades o porosidades y tiene las características de una suelda profesional.

El próximo ensayo de los varios cordones de manufactura aditiva fue iniciado una vez que la suelda haya sido aprobada y tenga las características ideales, consistió en una placa con 5 probetas: cordón simple, cordón doble, cordón triple, cordón de cuatro sueldas, y el último de 5 sueldas (figura 8). Se logra ver como el cordón simple y el doble son perfectos, la continuidad y la posición del segundo cordón sobre el primero es preciso. En la tercera probeta, la de 3 cordones de soldadura, se encuentra que los primeros dos cordones fueron hechos con precisión y que se fusionaron perfectamente, pero el tercer cordón inició tarde y no empieza con los dos cordones previos; esto puede ser porque entre cada suelda se limpia la escoria y el movimiento de la raspada sobre el cordón distorsiona la posición de la base y la impresora al volver a soldar ya no tiene la misma posición cero; también puede ser porque el operario no activó el arco eléctrico al tiempo que debía hacerlo. En la cuarta probeta se ve que se ha derramado suelda en la entrada del último cordón, y que en el tercero hay un pedazo de alambre que no fue fusionado completamente; de la misma manera hubo un destiempo al iniciar la soldadura y un cambio de la posición cero de la máquina, al iniciar antes la soldadura se crea un derrame en la punta y al estar desplazada la posición cero el alambre no toca con la soldadura previa y no llega al punto de fusión. En la última probeta ocurre lo mismo del derrame en la entrada, pero también en la longitud del cordón, lo que se debe a que la temperatura fue muy alta y no se logró controlar la deposición del material, esto es porque el tiempo entre cada suelda no fue el suficiente y la pieza estuvo precalentada que al incluir más energía llega a temperaturas más altas, o porque se debería bajar la corriente entre cada suelda para que esto no suceda. A pesar de que se presentaron esos defectos en las probetas es un éxito haber logrado las probetas, al controlar la posición, la precisión y el tiempo de inicio entre

cada suelda, y al controlar el tiempo de espera entre cada suelda, se puede controlar mejor y obtener mejores resultados con las futuras probetas.

Como se logró ver en el ensayo anterior en la probeta de 5 cordones hubo un derrame y esto se debe a la temperatura. La impresora siendo de acrílico necesita un control sobre la elevación de temperatura, y para futuras manufacturas se necesita saber los ciclos térmicos de la placa y la suelda. Se coloca la termocupla y se miden los ciclos de térmicos, no fueron correspondidos exactamente los datos teóricos y los experimentales. Primero se debe tener en cuenta que la placa no es 100% homogénea, su espesor tampoco es el mismo tiene una tolerancia de 0.5 mm, ya que su espesor no es constante también varía la altura donde trabaja el arco eléctrico, las termocuplas puede que se hayan movido y no hayan entregado datos reales. Como fue descrito en la metodología, la termocupla se encontró a un lado de la suelda en el extremo de la placa, entonces se obtienen los datos de esa posición (figura 10), ya que la suelda se encontraba prácticamente en la mitad de la placa; se puede estimar que los datos de los extremos de la placa tienen la misma temperatura que llegan a un máximo de 104 °C. El tiempo de espera entre cada suelda supera los 25 minutos y por eso lograba bajar de los 60 °C. Con esta información se puede utilizar para definir el precalentamiento de las probetas ya que se pueden disminuir los esfuerzos residuales, mientras mayor sea el precalentamiento menor el esfuerzo residual, eso se logra ver en las micrografías también. Con esta información se puede hacer otro ensayo donde utilizando precalentamiento se utilice una temperatura mayor hasta llegar al derrame de material, y encontrada esa temperatura de precalentamiento se puede definir cuánto tiempo es el ideal para esperar y qué temperatura es la ideal antes de ser soldada otra vez.

De esta manera se logra definir el punto preciso para disminuir los esfuerzos residuales lo que es un problema importante en la manufactura aditiva con fusión de arco y alambre. Con estos datos se logra mantener un registro para el control de seguridad de la máquina para que no se sobrecaliente y se mantengan las piezas en buen estado.

Los datos obtenidos por MatLab (figuras 11 a 17) utilizan el modelo matemático de Rosenthal, que tiene varios problemas, el principal es que define a la placa sin sus geometrías reales, no toma en cuenta que tiene bordes ni son ingresadas las dimensiones de la placa donde existe una transferencia de calor importante; sólo toma en cuenta el tiempo de suelda que cuando la termocupla está lejos no llega teóricamente la temperatura, pero en realidad llega y es parte de su ciclo térmico después de la suelda. Tampoco es tomado en cuenta el espesor de la placa y se asume que la distribución de temperatura es en el plano, y el asume también un punto por donde pasa la transferencia de calor y no toda la suelda. Asume también un estado estable y no el movimiento de la suelda. Los datos teóricos pueden ser útiles pero para este proyecto los experimentales entregan la información que es necesaria. Lo que se puede hacer con la simulación es estimar qué pasaría con un precalentamiento y así estimar las temperaturas para disminuir los esfuerzos residuales.

Se hizo un ensayo más de 6 capas de suelda ya con la información de los previos ensayos y surgió la siguiente probeta para tomar las micrografías.



Figura 22: Probeta de 6 capas



Figura 23: Probeta de 6 capas

En las micrografías se logra observar el cambio de grano en la zona afectada por el calor HAZ, en el cambio de interfaces se logra ver como el grano de ser pequeño crece y luego vuelve a decrecer, en los cordones previos al último se encuentra muy poca bainita ya que tuvieron varios tratamientos térmicos. Existe un precalentamiento en el cordón previo al siguiente, y los primeros tuvieron varios cambios de temperatura y más tiempo en desarrollar una difusión de carbón, se encuentra perlita, y esos tratamientos extras permitieron la formación de ferrita. Se logra ver el cambio de las fases de la HAZ donde cambia de los granos de la base a granos con mayor incremento en ferrita y perlita luego baja el tamaño de grano y vuelve a subir bajando la perlita, con austenita en el centro con ferrita y vuelve a bajar el tamaño del grano como el la tercera zona de HAZ donde el grano es fino en la zona de recristalización. Se encuentra un incremento considerable de bainita en la última capa, ya que su enfriamiento fue directo con el ambiente y aunque hubo un precalentamiento de previas capas hubo un tiempo de espera de 25 minutos e inició su precalentamiento en 60 °C pero no es lo suficiente como para evitar la bainita. Se encuentra de forma macro que existe un cambio de granos pequeños a grandes a pequeños a lo largo de la pieza de forma transversal, su cristalización alternante y no homogénea podría ser un problema ya que se desea que las piezas sean homogéneas, se han creado varios sistemas de enfriamiento para que sea continuo y estable ya que el enfriamiento es donde se controla la cristalización del material. En los esfuerzos residuales es donde hay más problemas y donde la industria busca más soluciones, según Rodrigues (2019) el primer problema con los efectos residuales está en la creación de bainita en la placa y que una vez que la bainita haya sido disminuida se encuentra que los esfuerzos residuales bajan considerablemente. Entonces solo se encuentra un cantidad importante de bainita en la

última capa, donde se infiere que es donde mayor esfuerzos residuales se almacenan, pero en el resto de la probeta se encuentra que hay poca bainita y bastante ferrita en granos pequeños y grandes alternados, lo que disminuye la posibilidad de que haya problemas con la probeta.

Finalmente el último ensayo es el de la manufactura de una pieza un álabe NACA 6421, se encuentra que hubo un poco de derrame ya que no hubo un tiempo de espera como en la probeta anterior sino que se utilizó un tiempo de espera de 7 minutos que no es suficiente. También se encuentra que es necesario post procesamiento, el homogeneizar la superficie y retirarlo de la base. Hubo varios ensayos de la pieza, donde la altura y el recorrido por la antorcha no eran óptimos, hubo discontinuidades porque hubo un pequeño derrame de capas anteriores y la altura de la antorcha ya no era la misma para toda la capa. Entonces nos encontramos con que no solo habían derrames sino ensanchamientos y la altura prevista ya no era igual, pero no por todo el cordón sino en ciertas partes y eso sí es un problema. La impresora responde a la programación y si no se tiene una altura fija entre cordones no va a ser óptima la manufactura, al no lograr mantener una estabilidad del espesor de la suelda se debe encontrar una forma automática de que la máquina responda a estos altibajos. Se encontró también pandeo o warping, el enfriamiento de la pieza hace que se contraiga el metal, y se contrajo la base y la pieza, en la pieza no se nota pero en la base tiene un pandeo considerable. Las soluciones para este problema viene en la optimización topológica de la pieza, construir soportes que evitan el pandeo y canalizan la transferencia de calor, otro sería que la base móvil de la impresora sea metálica y tenga la resistencia como para agarrar a la base con fuerza suficiente. El alabe como una primera

muestra de lo que la máquina puede hacer es un gran comienzo, tiene las capas en posición, las sueldas tienen una calidad alta, y el tiempo de manufactura fue corto. Esto demuestra que la máquina puede construir piezas y que se necesitan más procesamientos y ciertas optimizaciones con los parámetros, y que la máquina funciona muy bien.

CONCLUSIONES

Se cumplieron todos los objetivos presentados, la máquina soldadora fue integrada a la impresora 3D, el acople entrega la seguridad de que la antorcha se mantenga fija y se logra que trabajen juntos la soldadora y la impresora 3D, automatizando el proceso de solda; las variables de la máquina de manufactura aditiva son programables remotamente desde el computador y se logró aislar el computador de la máquina para que funcione sin la necesidad de un computador conectado, lo que brinda seguridad para la computadora y el usuario; el sistema es capaz de generar cordones a partir de las especificaciones del usuario, lo que significa que la programación permite cambios en la velocidad de avance, distintas longitudes de los cordones y distintas alturas. La calidad y el tiempo han sido optimizados y superan las de una soldadura manual. El espacio donde trabaja el robot es estrecho pero de todas maneras se logran crear cordones excelentes en un espacio definido por los límites de la impresora. La recolección de datos de las temperaturas fue un éxito y permite el futuro análisis y programación de piezas y probetas. El análisis teórico de los ciclos térmicos está generalizando varios datos lo que le priva de encontrar datos más exactos y reales, pero de todas maneras son buenas aproximaciones para la optimización del sistema. La máquina con los parámetros definidos es capaz de realizar cordones perfectos de manufactura aditiva con varias capas. La máquina produce piezas de manufactura aditiva con un buen tiempo y como era esperado las piezas necesitan de post-procesamiento para finalizar la manufactura de la pieza. El sistema cumple con todos los objetivos planteados y tiene la capacidad de generar cordones de soldadura de excelente calidad a partir de las especificaciones del usuario.

Se construyó una máquina herramienta de WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing) manufactura aditiva a base de fusión de arco y alambre, la cual funciona como un sistema CAD/CAM, desde el diseño en CAD se crea una pieza a partir de capas de soldadura y se tienen probetas y datos para las futuras manufacturas. La máquina herramienta abre las puertas a distintas áreas de investigación y manufactura. Con la misma máquina se podría expandir los límites o el área de trabajo cambiando los ejes y las estructuras creando una gran máquina soldadora, y el sistema operativo no necesita cambiar nada. Se podría desarrollar un sistema de scanner donde la máquina o la computadora recopila datos del área de trabajo y que responda a partir de esa información, lo que podría ayudar con sueldas en sitios específicos de piezas, unión de piezas, o inclusive optimización de la manufactura de una pieza durante la misma manufactura, como cambios en desniveles. Se abre la puerta a un sistema de enfriamiento para homogeneizar los granos y la estructura cristalina de la pieza. Se pueden hacer investigaciones de soldadura, de manufactura aditiva, y de ingeniería de materiales analizando probetas. Se logra ver que por el alto rendimiento de la máquina puede ser usada en manufactura en serie y que el mercado necesita investigación y desarrollo sobre esta tecnología.

BIBLIOGRAFÍA

DeWitt. Bergman. Lavine (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Incropera. United States of America. John Willey & Sons.

Giachino, W. (1997). *Tecnica y practica de la soldadura*. Michigan: Reverte.

Groover M. (2007). *Fundamentos de Manufactura Moderna*, McGraw Hill, México DF.

Guerra, E. (2018). *National Welding Month: Time to Let Everyone in on the Secret*. [online] American Welding Society. Recuperado el 05 de mayo de 2019 de: <https://www.aws.org/resources/detail/national-welding-month-time-to-let-everyone-in-on-the-secret>

Howard B., Scott C. (2005). *Modern Welding Technology*. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education. [ISBN 0-13-113029-3](#).

Kou, S. (2003). *Welding Metallurgy*. New Jersey: John Wiley & Sons.

Le Quesne, N. (2017). The Coming Workforce Crisis in Welding. Recuperado el 05 de mayo de 2019 de: <https://www.linkedin.com/pulse/coming-workforce-crisis-welding-neil-le-quesne>

Rodrigues T., V. Duarte, R.M. Miranda, Telmo G. Santos and J.P. Oliveira (2019). *Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)*. Lisboa: UNIDEMI.

Ruiz Saavedra J., (s/f) *Guía para la Inspección Visual de Soldaduras AWS B1.1 GEND*

Sher, D. (2018). *The global additive manufacturing market 2018 is worth \$9.3 billion*. [online] 3d Printing Media Network. Recuperado el 05 de mayo de 2019 de:: <https://www.3dprintingmedia.network/the-global-additive-manufacturing-market-2018-is-worth-9-3-billion/>

Tapia G., (2013) *Implementación de un brazo robótico para aplicaciones de soldadura por fusión*. (Tesis de pregrado) USFQ, Quito

ANEXO B

CÓDIGO DE ROSENTHAL

```

E = 20; %voltaje
I = 110; %corriente
n = 0.875; %eficiencia
Q = n * E * I; %calor
L = 9e-2; %longitud de la pieza
T0 = 22+ 273.15; %temperatura inicial
g = 20e-3; %espesor
k = 41; %conductividad térmica
pC = 4.5e6; %densidad*calor especifico
af = k/pC; %difusividad térmica
Tm = 1800; %temperatura de fusión
V = 3.5e-3; %velocidad de avance
t = linspace(L/V, 0); %tiempo t=distancia/velocidad
y = 4e-2; %distancia normal
T_ros = zeros(size(t)); %vector para guardar datos Rosenthal
for i=1:size(t,2)
x = L- t(i)*V; % distancia = tiempo*velocidad
r = sqrt(x^2+y^2); %distancia radial desde el origen
z = V*r/(2*af); %argumento funcion Bessel
K0 = besseli(0,z); %funcion Bessel modificada tipo 2 orden 0
T_ros(i) = T0 + Q/(2*pi*k*g)*exp(V*x/(2*af))*K0; %ecuacion de Rosenthal
end
plot(t,T_ros) %Ciclo térmico

```

ANEXO C

CÓDIGO DE ENFRIAMIENTO

```

g= 9.81; %gravedad
k = 50; %conductividad termica
pC = 4.5e6; %densidad*calor especifico
af = k/pC; %difusividad termica
Ts= 390; %Placa T .C
Ta= 25 + 273;%Ambiente T .C
W= 0.22; %Width .m
L= 0.22 ;%lenght .m
A= W*L;%Area .m^2
th= 6e-3;%thickness
Lc= (A/(2*W+2*L));
V=A*th;
As=2*W*th + 2*L*th + W*L;
Lc2=(V/As);
e=0.52;
sigma= 5.678e-8;
rhom= 7850;
CE= 470;
%Tfilm
Tf=(Ts+Ta)/2
% Interpolacion de la Tabla 4: Propiedades Termodinamicas de Gases en
% Presion Atmosferica
xd= [ 300, 350, 400];
xrho= [1.1614, 0.995, 0.8711];
xpr= [0.707, 0.7, 0.690];
xv= [15.89, 20.92, 26.41];
xalf= [ 22.5, 29.9, 38.3];
yi=[300, Tf, 400];
vr= interp1(xd, xrho, yi);
vpr= interp1(xd, xpr, yi);
vv= interp1(xd, xv, yi);
valf= interp1(xd, xalf, yi);
% Interpolacion de la Tabla 4

%Prandtl Number, y propiedades del aire
Pr= vpr(1,2)
alf= valf(1,2)
rho= vr(1,2)
v=vv(1,2)

```

```

beta= 1/Tf
%Grashof Number
Gr = g*beta*(Ts-Ta)*((Lc)^3)/(v^2)

%Rayleigh Number
Ra = Gr*Pr

%Nusselt Number para la superficie caliente superior existen 2 intervalos
%para 10e4 <Ra< 10e7
Nu= 0.54*(Gr*Pr)^0.25

%para 10e7 <Ra< 10e11
% Nu= 0.15*(Gr*Pr)^0.33

h=Nu*k/(A/(2*W+2*L))

Bi=h*Lc2/k

red = @(t,T) -1*[1/(rho*CE*Lc2)]*[h*(T-Ta)+ e*sigma*(T^4 - Ta^4)] ;
t= [0 1000]

[t,T]= ode45(red, t, Ts);
plot(t,T)
xlabel('Tiempo [s]', 'FontSize',14)
ylabel('Temperatura [C]', 'FontSize',14)

```