



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Producción y caracterización de piezas
de acero ER-70S-6 obtenidas mediante
un proceso de soldadura automatizado**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Miguel Ángel López Salazar

DIRECTOR DE TESIS

Dr. José Javier Cervantes Cabello



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme la oportunidad de desarrollarme como ser humano, darme una educación de excelencia desde bachillerato y por cultivar en mí una curiosidad y sed insaciable por aprender y crecer.

A la Facultad de Ingeniería por darme la oportunidad de aprender de los mejores del país, por creer en mi potencial y por enseñarme la ingeniería como una herramienta para colaborar en el desarrollo de México.

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM DGAPA, por el financiamiento a través del programa PAPIME del proyecto PE101323 denominado *“Desarrollo de un Módulo Automatizado para la Enseñanza de Procesos de Soldadura”*

A mi asesor, el Dr. José Javier Cervantes Cabello por darme la oportunidad de unirme al proyecto de investigación para poder realizar esta tesis, además, por todas las atenciones y conocimientos que me brindó durante estos 2 años de trabajo juntos.

A Grupo DeAcero y a Grupo Truper por creer en mi potencial y darme la oportunidad de comenzar mi carrera profesional como ingeniero mecánico a la par que desarrollaba este trabajo.

Dedicatoria

A mi mamá Alejandra López Salazar, quien me apoyó siempre en cualquier decisión que he tomado y me ha sacado adelante, dándome el ejemplo del trabajo duro y la constancia.

A mi hermano Gael, espero que pueda encontrar en mí siempre un modelo a seguir y un apoyo en cualquier camino que decida tomar.

A mis tíos César, Marco, Dulce y a mi abuelita Ali, por haberme formado desde niño, apoyarme en toda mi vida académica y guiarme con el ejemplo a tomar el camino del estudio y la disciplina.

A mi mascota y eterno compañero Peluso, que me enseñó el amor incondicional y me acompañó todas mis noches de desvelo en mis estudios. Su paso por este mundo me enseñó a ser una mejor persona.

Objetivos

El objetivo de la presente tesis es manufacturar probetas para ensayo de tensión e impacto mediante un proceso de manufactura aditiva, utilizando microalambre ER-70S-6, todo esto mediante la integración de un equipo de soldadura MIG con un router CNC para automatizar el proceso de soldadura. Finalmente, realizar los ensayos correspondientes y obtener las propiedades mecánicas resultantes del proceso. Se pretende brindar una guía y referencia sobre los parámetros de manufactura y las propiedades mecánicas que se pueden obtener adoptando un proceso de soldadura automatizado que puede ser fácilmente replicado, además de sugerir posibles aplicaciones del proceso dados los resultados.

Esquema General de la Tesis

Para el desarrollo de la tesis se manufacturaron 10 probetas de tensión y 10 probetas de impacto mediante un proceso de soldadura automatizado, depositando capas sucesivas de material (ER-70S-6) fundido para posteriormente maquinar a las medidas solicitadas por las correspondientes normas internacionales, seleccionar las que tengan menor número de defectos y realizar ensayos de tensión e impacto para poder obtener las propiedades mecánicas y posibles áreas de aplicación.

El capítulo 1 muestra un panorama general sobre la manufactura aditiva con metales, los diferentes procesos que existen, empresas que realizan desarrollos en el área, aplicaciones, ventajas y limitaciones.

El capítulo 2 se centra exclusivamente en el proceso de manufactura aditiva desarrollado en la experimentación de ésta tesis (por medio de arco de alambre), se describen los diferentes subprocesos que existen, sistemas que se utilizan en la industria, además de exponer los aspectos más importantes y generales de la física detrás de este proceso: la naturaleza del arco eléctrico, los fenómenos de transferencia de calor y mecánica de fluidos que existen en un proceso de soldadura y la formación de esfuerzos residuales.

El capítulo 3 explica la metodología experimental para la obtención de las probetas, los parámetros utilizados para poder soldar de manera estable cada capa, el postprocesamiento (maquinado de las piezas), las medidas finales y los tiempos.

El capítulo 4 consiste en la realización del ensayo de impacto de Charpy y de Tensión, dando una explicación de ambos ensayos.

El capítulo 5 muestra los resultados obtenidos en ambos ensayos mecánicos.

Por último, en el capítulo 6 se discuten y analizan los resultados, relacionando los defectos y su probable causa con los fenómenos físicos del capítulo 2. Se muestra una comparativa con valores reportados en experimentaciones similares y se sugieren posibles aplicaciones del proceso tomando en cuenta los resultados obtenidos.

Índice

1) Procesos de Manufactura Aditiva con Metales	9
1.1) ¿Qué es la Manufactura Aditiva?	9
1.2) Manufactura Aditiva con Metales	10
1.2.1) Powder Bed Fusion (PBF)	11
1.2.2) Direct Energy Deposition Method (DED)	13
1.2.3) Binder Jetting (BJ)	14
1.2.4) Material Extrusion (ME)	16
1.2.5) Sheet Lamination (SL)	17
1.3) Ventajas y Alcances de la Manufactura Aditiva	18
1.3.1) Prototipado Rápido y Respuesta Ante Bajos Volúmenes de Producción	18
1.3.2) Complejidad Geométrica y Reducción de Peso	20
1.3.3) Reparación de Componentes y Solución al Desabasto en Emergencias	22
Fuentes	24
2) Manufactura Aditiva por Medio de Arco de Alambre	27
2.1) ¿Qué es la Manufactura por Medio de Arco de Alambre	27
2.2) Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)	28
2.3) Plasma Arc Welding (PAW)	29
2.4) Gas Metal Arc Welding (GMAW)	30
2.5) Física Detrás del Proceso	32
2.5.1) El Arco Eléctrico	32
2.5.2) Flujo de Calor en WAAM	33
2.5.3) Esfuerzos Residuales	36

2.5.4) Flujo del Material Fundido	38
Fuentes	40
3) Metodología Experimental (Obtención de los Productos)	43
3.1) Acero ER70S-6	43
3.2) Equipo Experimental	44
3.3) Proceso de Impresión 3D	46
Fuentes	50
4) Realización de Pruebas Mecánicas	51
4.1) Ensayo de Tensión	51
4.2) Realización de Ensayo de Tensión	54
4.3) Ensayo de Impacto de Charpy	54
4.4) Realización del Ensayo de Impacto de Charpy	55
Fuentes	56
5) Resultados de Pruebas Mecánicas	57
5.1) Resultados de Ensayo de Tensión	57
5.2) Resultados de Ensayo de Impacto	59
6) Conclusiones y Comentarios	61
6.1) Reducción en Desperdicios de Materia Prima	61
6.2) Defectos Persistentes	62

6.3) Propiedades Mecánicas	63
6.4) Posibles Áreas de Aplicación	64
Fuentes	65

Capítulo 1:

Procesos de Manufactura Aditiva con Metales

1.1 ¿Qué es la Manufactura Aditiva?

La basta cantidad de procesos de manufactura que existen en la actualidad pueden ser clasificados en 3 bloques principales (ver figura 1.1):

- Manufactura Formativa
- Manufactura Sustractiva
- Manufactura Aditiva

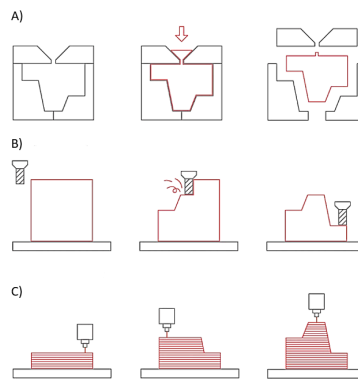


Figura 1.1. Los tres tipos principales de procesos de manufactura: A) Manufactura Formativa, B) Manufactura Sustractiva, C) Manufactura Aditiva [1].

Los procesos de *manufactura formativa* son todos aquellos en donde se parte de un material base, el cual, por medio de cambios de temperatura y/o la aplicación de fuerzas, obtienen la forma final deseada, la cual es dada generalmente por un herramental especial. Como ejemplos de estos procesos podemos encontrar la fundición, la forja, el estampado, etc. Por otra parte, los procesos de *manufactura sustractiva* son aquellos en donde se parte de una pieza de trabajo, a la cual se le irán retirando secciones de material por medio de herramientas de corte, con el fin de llegar a la geometría final deseada. Como ejemplo tenemos procesos de corte como el torneado y fresado. [1]

Para el caso de la manufactura aditiva, la American Society of Testing Materials (ASTM) y la International Organization for Standard (ISO), en colaboración con el European Committee for Standardization (CEN), definen en la norma ISO/ASTM 529000:2021 [2] la manufactura aditiva como:

“Proceso de unión de materiales para fabricar piezas a partir de datos de modelos 3D, normalmente capa sobre capa, en contraposición a las metodologías de manufactura sustractiva y manufactura formativa”.

La idea de construir un objeto capa por capa no es un descubrimiento de nuestros tiempos; el apilamiento de capas de ladrillos unidas por capas de cemento para construir edificaciones, o las recetas de repostería que involucran la creación de pasteles por medio de capas son un par de ejemplos de cómo hemos adoptado este proceso en nuestras vidas. Sin embargo, la manufactura aditiva encuentra con el avance de los equipos de cómputo una oportunidad de brillar. Es en 1983 cuando el ingeniero físico Charles Hull crea la primera pieza impresa mediante una técnica conocida como estereolitografía, la cual consiste en la

solidificación de un polímero líquido fotosensible por medio de un haz de luz incidido por un láser, técnica que él mismo inventó y patentó un año más tarde (ver figura 1.2) [3].

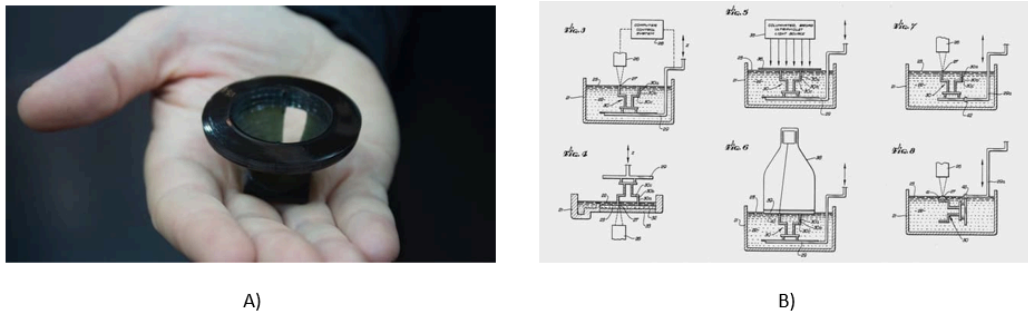


Figura 1.2. A) Primera pieza creada por manufactura aditiva de la historia. B) Patente de la máquina de estereolitografía [3].

La idea de obtener piezas impresas nace cuando Hull se encontraba trabajando con polímeros endurecibles por luz ultravioleta. Después de obtener resultados satisfactorios con su aparato de estereolitografía, Hull presenta un plan de negocios para poder comercializar esta nueva tecnología, dando así el nacimiento de la industria de la manufactura aditiva en 1986 con la fundación de la empresa “3D Systems”. La idea original de la empresa era dar solución a la fabricación de prototipos rápidos, motivo por el cual la industria automotriz de la época adoptó bastante bien el uso de la manufactura aditiva como forma de hacerle frente a las empresas asiáticas que les sacaban ventaja, pues, con la generación de prototipos rápidos, el ciclo de diseño se acelera dando paso a poder mejorar los productos de manera más eficiente [4].

Al inicio, 3D systems nació con la filosofía de adoptar el mercado de la manufactura de prototipos y no de piezas funcionales, además, el único material utilizado eran los polímeros y no metales; llegaron a pensar adoptar esta tecnología de un modo indirecto en el mundo de la manufactura de piezas metálicas con la fabricación de patrones para poder realizar moldes de fundición en arena.

1.2 Manufactura Aditiva con Metales

La misma norma que se encarga de definir a la manufactura aditiva, define los 7 tipos principales de proceso que la conforman:

- **Binder Jetting (BJ), Inyección de aglutinante:** Proceso de manufactura aditiva en el cual se aplica de manera selectiva un agente adhesivo líquido para unir materiales en forma de polvo.
- **Direct Energy Deposition (DED), Deposición directa de energía:** Proceso de manufactura aditiva en el cual se emplea energía térmica focalizada para fundir materiales mientras se van depositando. “Energía térmica focalizada” implica que una fuente de energía (como láser, haz de electrones o un arco de plasma) se enfoca para ir fundiendo los materiales depositados.
- **Material Extrusion (ME), Extrusión de material:** Proceso de manufactura aditiva en el cual el material es aplicado de manera selectiva mediante el uso de una boquilla u orificio.
- **Material Jetting (MJ), Inyección de material:** Proceso de manufactura aditiva donde se colocan de manera selectiva pequeñas gotas del material inicial.
- **Powder Bed Fusion (PBF), Fusión de lecho de polvo:** Proceso de manufactura aditiva en el cual la energía térmica funde de manera selectiva áreas específicas de una capa de polvo.
- **Sheet Lamination (SL), Productos Laminados:** Proceso de manufactura aditiva en el cual se va uniendo láminas de material para ir creando la pieza.

- **Vat Photopolymerization (VP), Fotopolimerización en cuba:** Proceso de manufactura aditiva en el que un fotopolímero líquido en un contenedor se endurece por la activación de la polimerización mediante luz. Casi todos los procesos descritos anteriormente han sido utilizados en la manufactura de metales. La primera adopción de metales en el mundo de la manufactura aditiva empieza a inicios de los años 1900, cuando la empresa EOS crea un proceso llamado “sinterizado directo de metales por láser” (Direct Metal Laser Sintering), que entra en la categoría de Powder Bed Fusion. Dicho proceso consiste en la colocación de capas de polvo metálico por las cuales se incide un haz de luz de un láser que va sintetizando capa tras capa del polvo metálico para obtener una pieza metálica [5].

Los procesos más utilizados en la industria para la fabricación de piezas metálicas [6] son:

- 1) Powder Bed Fusion
- 2) Direct Energy deposition
- 3) Binder Jetting
- 4) Material Extrusion
- 5) Sheet Lamination

A continuación, se hará una descripción de cada uno de estos procesos.

1.2.1 Powder Bed Fusion (PBF)

En este proceso, una fuente de calor móvil va sintetizando o fundiendo de manera selectiva las partículas de polvo mientras pasa una zona predefinida, correspondiente a la sección transversal de la capa de construcción de la pieza deseada, dando forma a piezas complejas capa por capa (ver figura 1.3). Con ayuda de mecanismos especiales se coloca una capa nueva de polvo metálico y se repite la aplicación de la fuente de calor, mientras las partículas se fusionan entre sí y con la capa anterior (ver figura 1.4). Este proceso se repite hasta que se finaliza la pieza, posteriormente, la pieza terminada permanece en la cámara de fabricación para enfriarse, se elimina el exceso de polvo y se cortan las piezas del sustrato y/o de las estructuras de soporte para obtener la pieza final.[6]

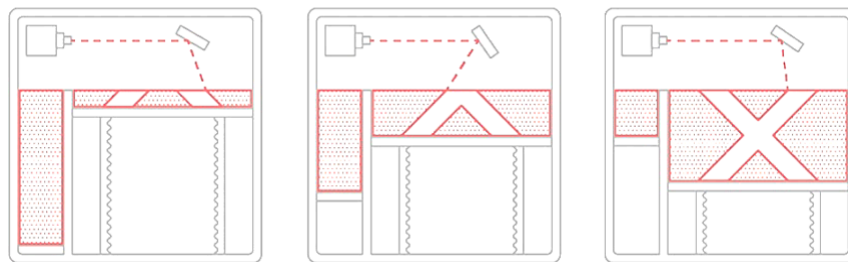


Figura 1.3. Powder Bed Fusion, la forma en “X” corresponde a la pieza final [1].

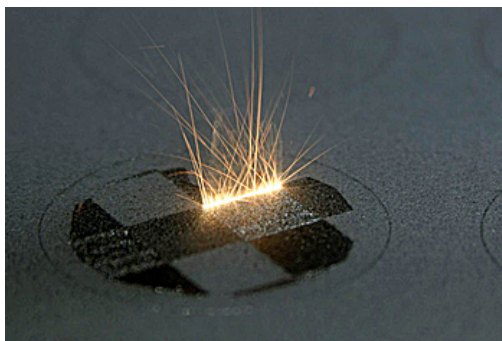


Figura 1.4. Vista de la formación de una pieza mediante LPBF [7].

Existen 2 fuentes principales de calor que pueden ser utilizadas en este proceso:

- 1) Fuente láser: En este caso, un láser (el cual es un haz de fotones) está enfocado a la zona deseada del polvo que se va a sinterizar. La absorción de fotones genera una transferencia de calor vía atómica por interacción electrón-fotón. Cuando se utiliza este tipo de fuente de calor, el proceso suele llevar el nombre de *Laser Powder Bed Fusion* (LPBF) o también se conoce como *Selective Laser Melting* (SLM). La cámara en donde se realiza el proceso es previamente llenada por un gas inerte que prevenga problemas como la degradación del gas o la oxidación de las capas generadas.
- 2) Aplicación de un haz de electrones: Con la ayuda de sistemas magnéticos y ópticos, es posible generar una corriente de electrones libres a alta velocidad en dirección a la zona específica que se desea sinterizar. En el momento en que los electrones del haz colisionan con los del polvo metálico, se generará una transferencia de energía cinética en las partículas, lo cual se traduce en un incremento en la temperatura. Cuando el proceso se lleva a cabo mediante este tipo de sistema de transferencia de calor, se conoce como *Electron Beam Powder Bed Fusion* (EB-PBF). Para un correcto funcionamiento del proceso la cámara en la cual se lleva a cabo el proceso debe de estar al vacío para evitar colisiones entre los electrones y las partículas de algún gas que permeó el ambiente.

Generalmente el haz de electrones se considera una fuente más eficiente, ya que puede abarcar mayor área de transferencia de calor en la capa de polvo que la que un láser puede abarcar, además, el haz de electrones se puede mover con mayor velocidad que el láser. Este proceso de manufactura se considera de una velocidad de producción media, con un sistema láser se pueden llegar a generar entre 5 - 20 [cm³/h], mientras que con un sistema que utilice un haz de electrones se pueden tener volúmenes de producción de 80 - 100 [cm³/h], además, hay que considerar que es un proceso donde se tienen ciclos térmicos repetidos capa tras capa, por lo que los tiempos de enfriamiento dentro del proceso deben de ser considerados como parte del proceso[6].

El proceso da como resultado una piezas completamente densas, cercanas a la forma final, sin embargo, generalmente se requieren procesos posteriores de maquinado para mejorar la superficie y dimensiones de la pieza (generalmente las piezas fabricadas por EB-PBF necesitan de polvos más grandes, lo cual se traduce en una mayor rugosidad superficial), y/o la aplicación de un proceso de prensa isostática caliente (Hot Isostatic Press) para reducir los niveles de porosidad de la pieza[6], sin embargo, a pesar de las porosidades presentes según [8] las propiedades mecánicas de piezas obtenidas mediante EB-PBF son muy

similares a aquellas obtenidas por un proceso convencional de fundición. Las dimensiones mínimas que una pieza puede alcanzar si es fabricada mediante PBF se encuentran entre 0.2 - 0.4[mm], mientras que las máximas que se llegan a poder generar son de 30 - 40[cm] (sin embargo, sistemas que sean posibles de imprimir piezas mayores a 1[m] mediante LBPF se encuentran siendo desarrolladas para fines de investigación, mientras que para EB-PBF existen estaciones de geometría cilíndrica con dimensiones para impresión de 35[cm] de diámetro por 38[cm] de altura).[8] Los materiales que pueden ser utilizados en éste proceso (y en los descritos posteriormente) son generalmente cualquier aleación que esté disponible para soldar, ya que existe una similitud entre ambos procesos, sin embargo, metales que son altamente conductivos (como el cobre o el aluminio) pueden ser difíciles de controlar en el proceso, por lo cual debe de tener especial cuidado a manejar estos materiales en un proceso de PBF[9].

1.2.2 Direct Energy Deposition (DED)

En este proceso, el material base (que puede encontrarse en forma de polvo o de alambre) va siendo fundido por una fuente de energía al mismo tiempo que va siendo depositado por una boquilla sobre un sustrato con el fin de unirlos. La boquilla, que va depositando el baño de fusión del material, suele ser conectada a un sistema automatizado que va siguiendo la trayectoria de impresión deseada para la pieza, de este modo, una vez completada una capa de material depositado, el sistema simplemente hace que la boquilla suba una distancia programada para repetir el mismo procedimiento sobre la capa anterior y así sucesivamente para ir formando la pieza. La automatización del proceso está directamente ligado a la adopción de tecnologías de control numérico y software CAD-CAM que se encargan de generar las trayectorias adecuadas para la pieza deseada. DED es un proceso que puede generar entre 500 - 4000 [cm³/h], con un ancho promedio de capa de entre 0.25 y 0.5 mm [9,10].

La clasificación de los procesos se basa en la fuente de calor que utilizan y la forma en que el material base se encuentra (ya sea en forma de polvo o de alambre). Las fuentes de calor utilizadas en este proceso pueden ser las mismas que se utilizan en PBD (fuente de haz de electrones o fuente láser), sin embargo, en este proceso se pueden utilizar otras fuentes de calor, tales como un *arco eléctrico*. De esta forma, si tenemos, por ejemplo, un proceso que utiliza como fuente de calor un láser y la forma en que el material base se encuentra es en polvo el proceso, por sus siglas en inglés, se conoce como Powder Feed Laser Direct Energy Deposition (PF-LDED), mientras que uno que utiliza un haz de electrones con un material base en forma de alambre se conoce como Wire Feed Electron Beam Direct Energy Deposition (WF-EB-DED) [6]. Un esquema general de cómo son los sistemas descritos anteriormente se muestran en la figura 1.5.

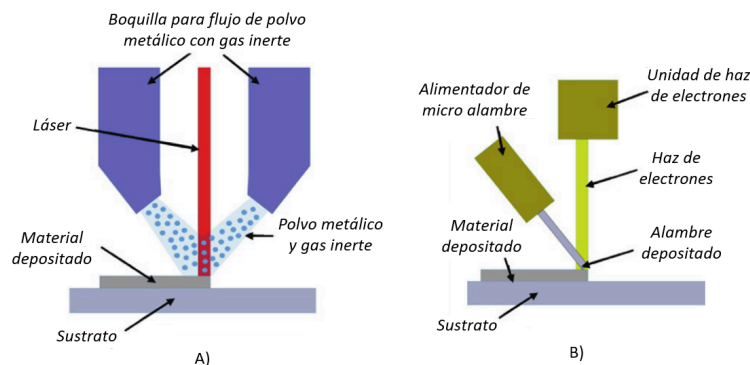


Figura 1.5. Esquema general de un sistema A) PF-LDED. B) WF-EB-DED. Tomada y traducida de [6].

El proceso genera un historial de ciclos de calentamiento y enfriamiento sobre las capas de material muy similar al generado en PBF y también se lleva a cabo rodeado de una atmósfera de gas inerte que proporcione la misma función de protección, sin embargo, en éste método la porosidad obtenida al final es mínima, dando lugar a piezas que generalmente tienen mejores propiedades mecánicas comparadas con aquellas generadas por PBF, ya que es posible tener control sobre la microestructura de nuestro material, por éstas ventajas, DED es un método idóneo no solo para la fabricación, sino también para la reparación de componentes (debido también a su alta velocidad de producción en comparación con PBF). Generalmente el proceso da como resultado superficies de menor calidad que aquellas obtenidas por PBF, lo cual hace que dentro del proceso se deba contemplar procesos extras de maquinado para cumplir con tolerancias o con procesos para mejorar el acabado superficial, lo cual también limita mucho la capacidad de generar piezas de alta complejidad, las cuales en PBF no llegan a ser ningún problema [9,10].

Debido a que DED es un proceso que va depositando el material base en un punto específico y no es colocado sobre toda una superficie (como en PBF) tiene una mayor extensión en las dimensiones de piezas que se pueden llegar a fabricar, ya que no se requiere de estructuras especiales que tengan que soportar el material (ver figura 1.6) y al mismo tiempo restringir las dimensiones de la pieza (como el caso de PBF, dónde las dimensiones se ven limitadas por el tamaños del sistema de colocación de las capas de polvo). Además, la integración de sistemas CNC brinda al proceso de los grados de libertad disponibles por los mecanismos de cada sistema en específico, logrando con esto poder imprimir geometrías más complejas (los cuales son necesarios si se requiere reparar una estructura en especial) [8].



Figura 1.6. Sistema PF-LDED BeAM Magic 800 de Henry Royce Institute, capaz de imprimir un volumen de 1200 x 800 x 800 [mm] con 5 grados de libertad, utilizado para reparar componentes de la industria aeroespacial [11].

Otro método de generar piezas por medio de DED consiste en utilizar un arco eléctrico como fuente de calor para un material base en forma de alambre, conocido comúnmente por medio de Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) dicho método puede ser fácilmente implementado por medio de equipo común de soldadura MIG o TIG para ir generando piezas del rollo de alambre de soldadura. La implementación de este proceso es parte del objetivo de este trabajo, por lo cual se dedica la totalidad del capítulo dos de esta tesis a la descripción y análisis del proceso.

1.2.3 Binder Jetting (BJ)

En éste proceso se tiene un sistema muy similar al descrito en PBF, el cual tiene la peculiaridad que en vez de tener un sistema de deposición de energía láser, o de un haz de electrones para lograr la consolidación de las capas de polvo metálico, se tiene un sistema de inyección (muy similar al de las impresoras de tinta comunes) de gotas de un agente aglutinante polimérico, el cual va siendo depositado siguiendo la geometría de sección transversal de cada capa de la pieza que se desea imprimir. Los sistemas BJ tienen

arreglos de cientos de boquillas que van depositando gotas de aproximadamente 80 micras de diámetro, las cuales van uniendo las zonas del polvo que se desean, generando la misma dinámica de un sistema PBF, utilizando sistemas de reacomodo de la cama de polvos para ir progresivamente uniendo las capas de polvo necesarias (ver figura 1.7). Al final del proceso se obtiene una pieza en forma verde, a la cual se le deberá de quitar el exceso de polvo y pasar a un proceso posterior de sinterización y remoción del agente aglutinante haciendo uso de un horno a alta temperatura [1,6].

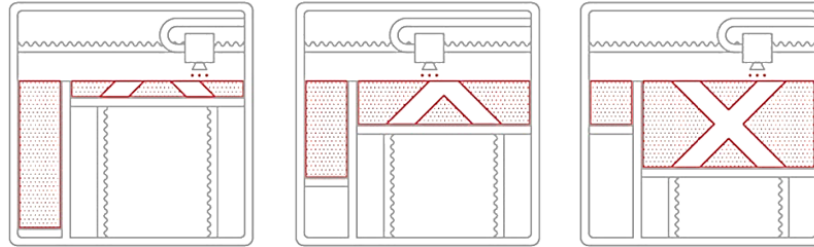


Figura 1.7. Binder Jetting, la forma en "X" corresponde a la pieza final [1].

El proceso fue creado en el MIT (Massachusetts Institute of Technology) en los años 90 y posteriormente la patente fue adquirida por la empresa ExOne. El proceso entrega piezas con una densidad cercana al 90%, ya que, debido a la remoción del agente aglutinante, se obtienen porosidades, las cuales también afectan a las propiedades mecánicas de la pieza. Sin embargo, BJ es considerado como el proceso de manufactura aditiva más rápido, ya que con ayuda de su sistema de inyección (ver figura 1.8) no se ve limitado a imprimir una sola línea de la capa de polvos por cada movimiento. Además, ofrece una ventaja económica ante PBF y DED ya que los sistemas de inyección son mucho más económicos que los sistemas láser y de haz de electrones [6,12].



Figura 1.8. Arreglo de boquillas de sistema de inyección Binder Jetting de ExOne [12].

Al igual que en PBF, se pueden generar geometrías muy complejas (las cuales son generadas generalmente por medio de archivos CAD) que serían prácticamente imposibles de obtener con otros procesos de manufactura convencionales, sin embargo, debido a la porosidad de la pieza, las propiedades mecánicas siguen siendo mejores cuando se llevan a cabo estos procesos convencionales. Es por esto que una fuerte aplicación de BJ es la creación de patrones de fundición que serían muy complejos (ver figura 1.9) y caros de producir por otras formas, reduciendo tiempos de semanas o meses a días [6,13].



Figura 1.9. Patrón de fundición generado por ExOne por medio de un proceso de Binder Jetting [13].

1.2.4 Material Extrusión (ME)

Este proceso es el más conocido en la industria de la manufactura aditiva, consiste en la deposición de un filamento sólido de material, el cual se aumenta de temperatura en una boquilla para obtener un flujo semilíquido que se va colocando sobre la trayectoria de la sección transversal de la pieza que se desea imprimir. Una vez colocado todo el material correspondiente a la sección transversal de la pieza, la boquilla sube (o la base del sistema baja) en la altura de una capa de material y el proceso se repite con la siguiente sección transversal (ver figura 9). Los sistemas de deposición de material son similares a los implementados en BJ, con la adopción de sistemas de control numérico y archivos CAD de la pieza. Según [1] este proceso se puede considerar esencialmente como la generación de piezas con una pistola de silicón caliente de alta precisión [1].

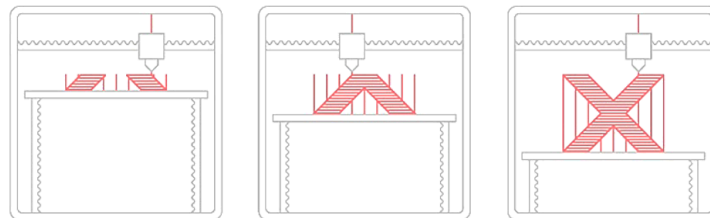


Figura 1.9. Material Extrusion, la forma en “X” corresponde a la pieza final [1]

Este proceso no requiere de la adopción de sistemas de alta energía (láseres o sistemas de haz de electrones) por lo cual se considera más seguro, y se puede llevar a cabo en ambientes no industriales. Existe en el mercado una gran cantidad de sistemas de ME para polímeros, las cuales se conocen comúnmente como “impresoras 3D”. Aunque el proceso fue originalmente diseñado para materiales poliméricos, en la actualidad existen adaptaciones de esta tecnología para metales. En la impresión de un material polimérico, cuando el filamento es depositado sobre el sustrato, la gradual reducción de temperatura de la pieza es suficiente para que se genere una adhesión entre capas, sin embargo, éste no es el caso de los metales. Los filamentos de metal para esta tecnología consisten en alambres rectos de partículas metálicas en una matriz polimérica (ver figura 1.10), los cuales se depositan siguiendo el proceso descrito anteriormente. Una vez obtenida la pieza final ésta debe pasar por un proceso de sinterizado que remueva los agentes poliméricos de las partículas metálicas y posteriormente las una [6].



Figura 1.10. Filamentos metálicos para ME [14].

Según la empresa estadounidense Desktop Metal™ [15], con este proceso se puede lograr fabricar piezas totalmente densas de hasta 5.25[mm] de grosor con propiedades mecánicas similares a las de piezas fabricadas por fundición, además, se tienen filamentos disponibles de una basta cantidad de aleaciones, desde aleaciones de aluminio, acero inoxidable y titanio [16]. Una vista de este proceso se puede ver en la figura 11.

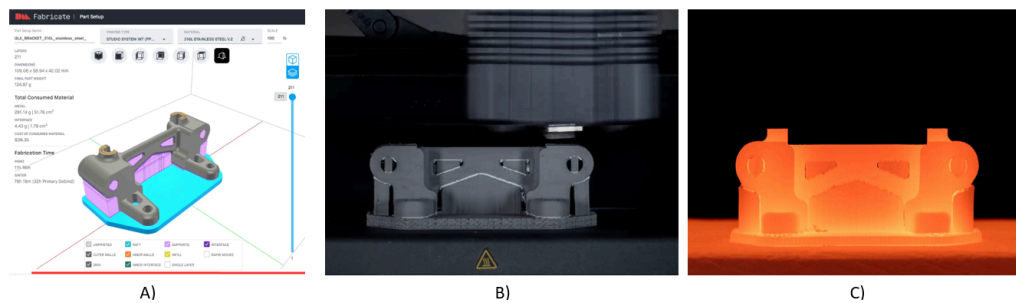


Figura 1.11. Proceso de fabricación de una pieza de soporte de acero inoxidable por medio de ME en Studio System™ 2 .
A) Procesamiento de la pieza por medio de un archivo CAD o STL. B) Impresión de la pieza. C) Sinterizado [15]

1.2.5 Sheet Lamination (SL)

También conocida como Manufactura Aditiva Ultrasónica, Sheet Lamination es un proceso de manufactura aditiva que no involucra cambios de fase del material base, todo se lleva a cabo en estado sólido. Este proceso se lleva a cabo mediante una técnica de soldadura conocida como ultrasónica, la cual consiste en colocar dos láminas de material (una sobre otra a fuerza constante) y aplicar vibraciones ultrasónicas (por medio de transductores y rodillos laminadores) que generen movimientos de cizallamiento que promuevan la eliminación de óxidos en la interfase de los metales. En metales, la ausencia de una capa de óxido favorece la unión metalúrgica de ambas superficies, ya que en las rugosidades locales entre ambos metales se tiene deformación plástica, la cual favorece las condiciones energéticas idóneas para obtener difusión y recristalización en metales, dando como resultado una unión metalúrgica (proceso descrito en figura 1.12) [6,17].

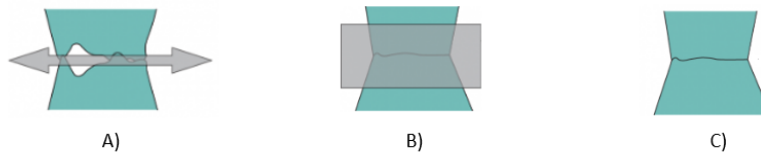


Figura 1.12. Proceso de manufactura aditiva ultrasónica. A) Las vibraciones ultrasónicas inducidas en la interfase rompen la capa de óxido. B) Deformación obtenida en la rugosidad de la interfase. C) Creación de una unión metalúrgica [17]

Una de las mayores ventajas de este proceso en comparación con los procesos descritos anteriormente es la nula alteración de las propiedades mecánicas del material base, debido a que no existen cambios de fase que alteren la microestructura final del producto, ya que todo el proceso se lleva a cabo a temperaturas muy inferiores a las de fusión de los metales involucrados. Además, es posible obtener uniones entre metales diferentes y colocar entre cada capa componentes electrónicos de instrumentación, creando así componentes embebidos (ver figura 1.13). El proceso va de la mano con un posterior maquinado de la pieza para obtener las medidas deseadas. La empresa Fabrisonic, que incluye sistemas de maquinado dentro de sus sistemas de Manufactura Aditiva Ultrasónica, considera a este proceso como un híbrido entre la manufactura aditiva y la manufactura sustractiva [17].



Figura 1.13. Piezas obtenidas por Fabrisonic mediante Manufactura Aditiva Ultrasónica. A) Termopar embebido dentro de una pieza impresa B) Llave Inglesa hecha de dos metales diferentes. [18]

1.3 Ventajas y Alcances de la Manufactura Aditiva

1.3.1 Prototipado Rápido y Respuesta Ante Bajos Volúmenes de Producción

Dentro del proceso de diseño de cualquier producto, la creación de prototipos físicos juega un papel muy importante en la validación e implementación de mejoras. Dichos prototipos se obtienen generalmente pueden llevar meses en ser manufacturados mediante técnicas convencionales. Sin embargo, desde su inicio la manufactura aditiva ha sido implementada para generar prototipos confiables, con una reducción de meses en el tiempo de manufactura (lo cual acelera el proceso de diseño del producto, pues es más rápido poder realizar las correcciones pertinentes del producto) y a un menor costo, ya que no hay necesidad de fabricar herramental especial ni gastar en costos de envío si se tiene la tecnología a la mano.[19] Un ejemplo de las ventajas que ofrece la manufactura aditiva en el prototipado rápido es el caso de la empresa Centor, dedicada al diseño y manufactura de sistemas de puertas, ya que gracias al sistema de prototipado rápido por manufactura aditiva “Digital Forge” de la empresa MarkForged, lograron reducir el precio de un prototipo de sistema de puerta plegable que originalmente se

manufacturaba por procesos de maquinado (ver figura 1.14) de \$800 a solo \$10, y pasando de 156 horas de tiempo de producción a solo 12 horas [20].

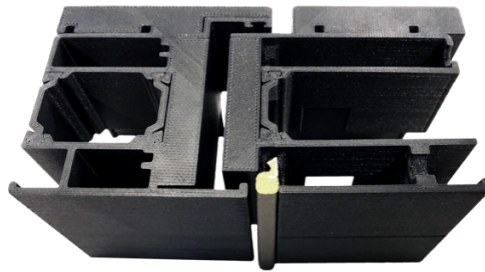


Figura 1.14. Prototipo de sistema de puerta plegable de Centor. Tras la adopción de métodos de prototipado por manufactura aditiva se obtuvo un 93% de ahorro de tiempo y un 99% de ahorro en costos [20]

Los prototipos también pueden realizarse en componentes metálicos, empresas como ProtoLabs ofrece servicios de prototipado por medio de PBF en 7 días o menos, con opciones de metales que van desde aluminio hasta titanio [21].

Debido a que la manufactura aditiva no requiere del uso de herramental especial para la producción de piezas puede ser utilizada como una alternativa ante situaciones donde se requiera producir un volumen bajo de piezas, ya que no resulta rentable a las industrias tradicionales al gasto de herramental para tamaños de producción tan bajos, ya que generalmente en procesos convencionales cada pieza requiere de un molde o dado único [9]. Lo anterior es especialmente crítico cuando se trabaja en industrias que no operan a grandes volúmenes de producción, tal es el caso de la industria aeronáutica y aeroespacial. La fuerza aérea de los Estados Unidos de América ha establecido programas de colaboración con General Electric (quien ha logrado adaptar exitosamente 7 componentes hechos por manufactura aditiva en su turbina GE9X [22], ver figura 1.15) para adoptar tecnologías de manufactura aditiva en el mantenimiento de su flota de aeronaves y no depender de externos, ya que una gran parte de las aeronaves están en su sexta década de servicio, lo cual es un gran riesgo en la dificultad de producir piezas con funciones críticas [23].

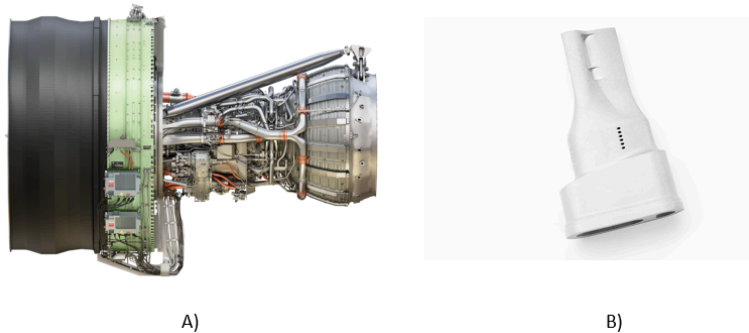


Figura 1.15. A) Turbina de avión GE9X de General Electric, considerada la turbina comercial más grande y potente del mundo [24]
B) Componente de turbina GE9X hecho por medio de manufactura aditiva [22].

Por el lado de la industria aeroespacial, la libertad de no tener que construir herramental especial juega un papel clave en la velocidad de producción de sistemas tan grandes como los cohetes espaciales. La forma clásica de fabricación de un cohete espacial implica primero la construcción de estructuras masivas para poder llevar a cabo los procesos de soldadura de las estructuras de un cohete. Para estos propósitos la National Aeronautics and Space Administration (NASA) en sus instalaciones dedicadas a ensamble en

Louisiana hace uso de una estructura conocida como Vertical Assembly Center (VAC), la cual es una estructura de 52m de altura únicamente construida para propósitos de soldadura de los tanques de propulsión [25], sin embargo, Relativity Space ha logrado construir cohetes espaciales deshaciéndose de la necesidad de complejas estructuras metálicas. su cohete Terran 1 tiene el 95% de sus partes impresas (sólo el sistema eléctrico ha sido construido por métodos tradicionales de manufactura), las cuales fueron construidas por medio de su tercera generación de impresoras (las cuales son brazos robóticos que realizan un proceso de Deposición Directa de Energía) que son capaces de generar piezas de hasta 9[m] de alto. En vez de construir un VAC, solo necesitan un sistema conector para colocar varias de sus impresoras a trabajar en paralelo y poder imprimir un cohete entero de 35[m] en menos de un mes (ver figura 1.16) [26].

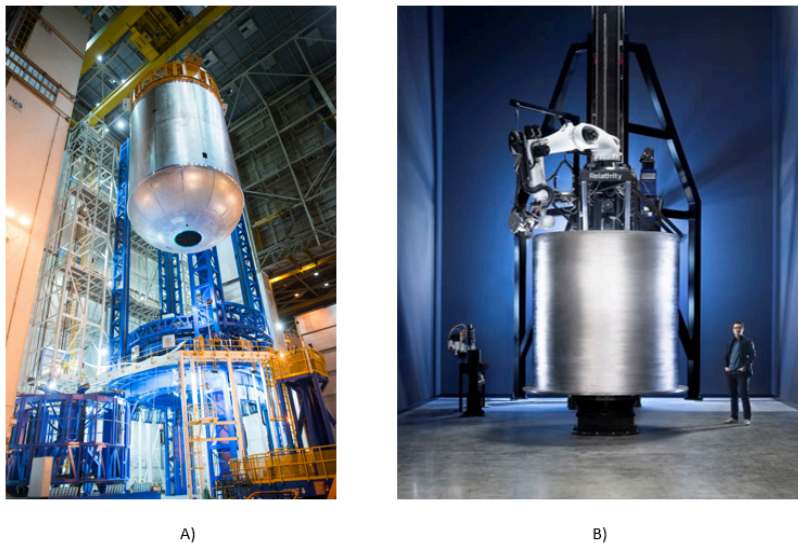


Figura 1.16. A) Vertical Assembly Center de la NASA ubicado en New Orleans [27] B) Sistema de impresión de cohetes espaciales de Relativity Space [26].

1.3.2 Complejidad Geométrica y Reducción de Peso

Una de las ventajas más grandes que ofrece la manufactura aditiva sobre los métodos tradicionales de manufactura es la capacidad de generar piezas de alta complejidad geométrica, las cuales serían probablemente imposibles de generar por medio de otro método convencional. La gran mayoría de los procesos de manufactura aditiva son “near net shape”, es decir, son muy cercanos a la forma final y requieren de pocos procesos posteriores una vez que salen del proceso de impresión, lo cual nos permite obtener piezas complejas sin deber tener como limitante en el proceso de diseño a la manufactura de nuestra pieza. Esto brinda una ventana de oportunidades al diseñador, ya que procesos de optimización topológica (los cuales suelen generar piezas que son muy caras de producir por métodos tradicionales o son prácticamente imposibles) pueden ser adaptados sin problema, dando como resultado una reducción del peso de una pieza sin comprometer su funcionalidad. En el 2018 la empresa automotriz alemana BMW utilizó por primera vez en la historia un componente hecho con impresión 3D para la producción de un vehículo en serie, el i8 Roadster. Por medio de un proceso de optimización topológica lograron obtener un diseño de soporte de techo 44% más ligero que el modelo original (ver figura 1.17), el cual se desempeña de manera satisfactoria ante las cargas solicitadas de operación [28, 29].



Figura 1.17. Proceso de optimización topológica de soporte de techo del BMW i8 Roadster, note la complejidad que implicaría la manufactura por métodos convencionales del diseño final [29].

Una aplicación en la cual la complejidad geométrica juega un papel importante es en la optimización de herramientas por medio de canales internos por los cuales se pueda disipar calor, pues esto se traduce en un aumento de la vida de la herramienta y una eficiencia mayor, ya que los tiempos de enfriamiento se reducen. En un proceso de inyección de plástico más del 40% del tiempo se ocupa solamente en la etapa de enfriamiento [6] por lo que una reducción del tiempo de enfriamiento puede aumentar demasiado la producción. La manufactura aditiva ofrece una solución para generar canales internos a una pieza (ver figura 1.18) por los cuales se pueda hacer circular un fluido que promueva la transferencia de calor y obtener una reducción de la temperatura de la pieza de forma más eficiente [30].

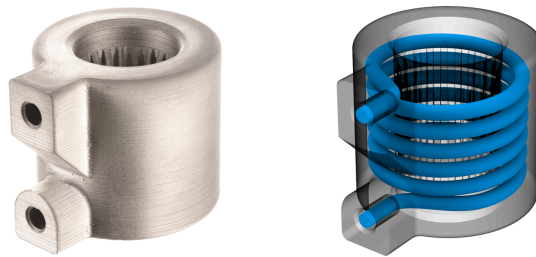


Figura 1.18. Canales internos de refrigeración, los cuales por medio de métodos de manufactura convencional serían demasiado complejos o prácticamente imposibles de poder realizar [30].

Otra ventaja de la libertad en la geometría de las piezas que se pueden manufacturar es la posibilidad de consolidar ensambles enteros en una sola pieza. En lugar de generar varios elementos los cuales van a ser unidos por medio de pernos o procesos de soldadura, es posible considerar la totalidad de un ensamble como una pieza única ya que sin importar su complejidad puede ser manufacturada. Un ejemplo de esta consolidación de piezas es el inyector de combustible del motor LEAP de General Electric utilizado para aviones de vuelo comercial. La geometría interior de la punta del inyector era muy compleja para ser manufacturada por procesos convencionales, por lo que para solucionar el problema llegaron a la solución de tomar la totalidad del inyector como una única pieza y utilizar manufactura aditiva (ver figura 1.19). Debido a la implementación de este proceso, el cual se hizo mediante PBF, se logró consolidar 20 partes en una sola con un 25% de reducción de peso como resultado. General Electric logró la manufactura de 30 mil de estas piezas consolidadas de 2015 a 2018, haciendo uso de más de 40 impresoras [31].



Figura 1.19. Inyector de combustible de General Electric creado por PBF [32].

1.3.3 Reparación de Componentes y Solución al Desabasto en Emergencias

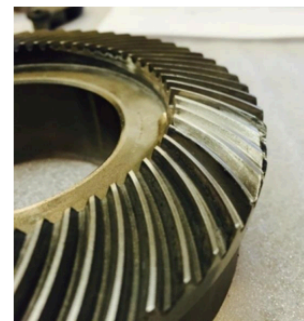
La manufactura aditiva ofrece una solución rápida y confiable en la reparación de equipo mecánico ante fallas de operación (lo cual puede ser significar un freno en la producción) o incluso errores de maquinado, que pueden representar un fuerte impacto en las fechas de entrega de un producto [6]. Un ejemplo de esto se muestra en la figura 1.20, dónde la empresa Optomec, por medio de un sistema de manufactura DED logró reparar exitosamente los dientes de un hipoide perteneciente a la maquinaria de una planta del sector alimenticio. Además de ser una solución rápida, las piezas reparadas por medio de técnicas de DED pueden presentar una mejora en la resistencia al desgaste que las piezas originales, lo cual puede ser una oportunidad de ahorro económico, ya que se estima que, al año, el gasto en daños por corrosión y desgaste es de aproximadamente 300 billones de dólares. El ejército de los Estados Unidos ha tenido ahorros de más de 5 millones de dólares al año al adoptar tecnologías de reparación por DED de componentes en el motor del tanque de combate M1 Abrahams, el cuál es utilizado en desiertos, donde las condiciones ambientales favorecen un gran desgaste de las piezas, lo cual hace que se requieran ciclos de mantenimiento más cortos. Los esfuerzos residuales obtenidos en un proceso DED son prácticamente nulos, lo cual los hace perfectos para esta aplicación, debido a la distorsión existente en las piezas del tanque debido a procesos de soldadura a altas temperaturas [33, 34].



A)



B)



C)

Figura 1.20. Reparación de un hipoide de una planta de Salsa en Nuevo México. La producción tuvo que ser detenida debido al fallo del componente. La reparación y puesta en operación de la planta tardó solo un día, comparado con las 8 semanas que se hubiera tardado pedir un reemplazo nuevo. A) Hipoide con dientes rotos. B) Dientes después de ser reparados por Optomec. C) Hipoide después de un proceso de maquinado, listo para volver a operación [34].

En marzo del 2020 la pandemia de COVID-19 tomó por sorpresa al mundo, en especial a la industria de la salud, pues en poco tiempo equipo se volvió crítica la adopción masiva de equipo personal de protección tal como cubrebocas, caretas protectoras, hisopos de pruebas de COVID-19, partes de ventiladores

mecánicos, etc. Una falta de reservas suficientes de estos insumos, combinado con la dependencia de países extranjeros (los cuales pasaban por la misma pandemia) para poder llevar a cabo la manufactura de dichos insumos, dio como resultado que universidades, pequeñas empresas, organizaciones gubernamentales y personas que practican la manufactura aditiva como hobby unieran fuerzas para poder manufacturar aquellas piezas que comenzaban a ser escasas en hospitales y centros de salud (ver figura 1.21). Tan solo en Estados Unidos, según la organización America Makes [35], entre febrero y julio del 2020 se estima que fueron fabricadas por medio de manufactura aditiva 38M de piezas de caretas protectoras, 12M de hisopos para pruebas de COVID-19, 2.5M de sujetadores de cubrebocas y 116K partes de ventiladores mecánicos para pacientes en estado crítico.

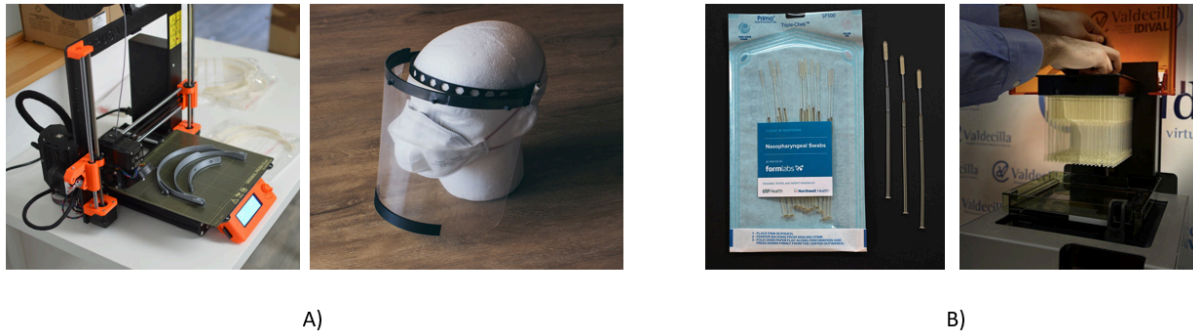


Figura 1.21. Insumos médicos fabricados por medio de manufactura aditiva durante la pandemia de COVID-19. A) Piezas de careta protectora fabricadas por la Agencia Espacial Europea (cada juego de piezas para una careta tarda entre 1.5 y 3 horas en ser manufacturado) [36], B) Hisopos para pruebas de COVID-19 fabricadas por la empresa FormLabs [37].

La flexibilidad de la manufactura aditiva es clave en la solución de problemas ante crisis humanitarias, debido a que la gran mayoría de sistemas de manufactura aditiva trabajan con modelos CAD, los cuales pueden ser fácilmente compartidos para poner en marcha la producción de un producto de una forma más rápida que con los métodos convencionales. Un ejemplo de esto se dio en febrero de 2022, cuando la invasión Rusa a Ucrania rápidamente generó desabasto de insumos médicos y militares en la zona, un mes más tarde, un grupo de voluntarios liderados por Jakub Kaminski (un ingeniero en robótica del Instituto Politécnico Worcester, en Boston) trabajó por 2 meses diseñando 8 versiones diferentes de torniquetes que pudieran ser fácilmente fabricados por manufactura aditiva y que pudieran salvar las vidas de los heridos en el campo de batalla. Cuando terminaron, subieron a internet el mejor de sus diseños (ver figura 1.22), consiguiendo que alrededor de 120 compañías e individuos se unieran a la causa y lograran manufacturar cerca de 5K torniquetes reusables para poder ser enviados a Ucrania [38].



Figura 1.22. Torniquete reusable hecho por medio de manufactura aditiva como apoyo a Ucrania. Se realizaron pruebas Ultrasónicas para comprobar que el torniquete es capaz de frenar por completo el flujo de sangre, además, voluntarios en laboratorios de Polonia corroboraron que el torniquete es capaz de soportar 150 [lbs] en tracción [38].

Fuentes

- [1] B. Redwood, Filemon Schöffner, and B. Garret, *The 3D printing handbook : technologies, design and applications*. Amsterdam, The Netherlands: 3D Hubs B.V, 2018.
- [2] ISO/ASTM, 52900:2021(en) *Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary*. ISO, 2021. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en>
- [3] “Our Story | 3D Systems,” *3D Systems*, Jan. 12, 2017. <https://www.3dsystems.com/our-story?smtNoRedir=1>
- [4] C. Sethi, “7 Questions with 3D Printing Icon Charles Hull,” May 05, 2016. <https://www.asme.org/topics-resources/content/7-questions-with-3d-printing-icon-charles-hull> [5] S. Pratheesh Kumar, S. Elangovan, R. Mohanraj, and J. R. Ramakrishna, “Review on the evolution and technology of State-of-the-Art metal additive manufacturing processes,” *Materials Today: Proceedings*, Mar. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.567>
- [6] Ehsan Toyserkani *et al.*, *Metal additive manufacturing*. Hoboken, Nj: Wiley, 2021.
- [7] Beamie Young\NIST, *Laser Melting Metal Powder*. Available: <https://www.nist.gov/image/image2chad-webjpg>
- [8] B. Blakey-Milner *et al.*, “Metal additive manufacturing in aerospace: A review,” *Materials & Design*, vol. 209, p. 110008, Nov. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>
- [9] P. Peyre and E. Charkaluk, *Additive Manufacturing of Metal Alloys 1*. John Wiley & Sons, 2022.
- [10] Sachin Salunkhe, S. T. Amancio-Filho, and J. Paulo, *Advances in Metal Additive Manufacturing*. Elsevier, 2022.
- [11] “Directed Energy Deposition System - Equipment and Facilities,” *Henry Royce Institute*. <https://www.royce.ac.uk/equipment-and-facilities/directed-energy-deposition-system/>
- [12] ExOne, “What is binder jetting?” *www.exone.com*. <https://www.exone.com/en-US/Resources/case-studies/what-is-binder-jetting>
- [13] ExOne, “X1 SandCast,” *www.exone.com*. <https://www.exone.com/en-US/X1-Tooling/X1-Sandcast>
- [14] T. Boissonneault, “A guide to design for Desktop Metal’s BMD process,” *VoxelMatters - The heart of additive manufacturing*, Mar. 16, 2020. <https://www.voxelmatters.com/a-guide-to-design-for-desktop-metals-bmd-process/>
- [15] D. Metal, “Studio System™,” *Desktop Metal*. <https://www.desktopmetal.com/products/studio>
- [16] D. Metal, “Desktop Metal materials - engineered to perform,” *Desktop Metal*. <https://www.desktopmetal.com/materials>

- [17] Fabrisonic, “3D Printing Metal Without Melting?” <https://fabrisonic.com/technology/>
- [18] Fabrisonic, “Printing the ‘Impossible.’” <https://fabrisonic.com/applications/>
- [19] Markforged, “Understanding Rapid Prototyping with 3D Printing,” *markforged.com*. https://markforged.com/resources/blog/understanding-rapid-prototyping-with-3d-printing?_geom=%E2%9C%AA
- [20] Markforged, “Functional Rapid Prototyping.” Available: <https://static.markforged.com/downloads/Prototypes-DoorHardware.pdf>
- [21] Protolabs, “Metal 3D Printing Service for Custom Parts | Online Quoting,” *www.protolabs.com*. <https://www.protolabs.com/services/3d-printing/direct-metal-laser-sintering/>
- [22] GE Additive, “3D Printed Engine: Bringing 3D Printing Inside The World’s Largest Jet Engine | GE Additive,” *www.ge.com*. <https://www.ge.com/additive/stories/3d-printed-jet-engine-meet-team-young-engineers-brought-3d-printing-inside-ge9x-worlds-largest>
- [23] GE Additive, “US Air Force and GE’s collaboration on metal additive reaches first technology milestone with 3D printed sump cover for F110 engine | GE Additive,” *www.ge.com*. <https://www.ge.com/additive/press-releases/us-air-force-and-ge-collaboration-metal-additive-reaches-first-technology-milestone>
- [24] GE Aerospace, “GE9X | GE Aerospace,” *www.geaerospace.com*. <https://www.geaerospace.com/commercial/aircraft-engines/ge9x>
- [25] K. Robinson, “NASA’s Space Launch System: An Evolving Capability for Exploration,” Jun. 2015, Available: https://www.researchgate.net/publication/330117970_NASA's_Space_Launch_System_An_Evolving_Capability_for_Exploration
- [26] M. Sheetz, “Inside Relativity Space’s 3D-printing rocket ‘factory of the future,’” *CNBC*. <https://www.cnbc.com/2020/10/07/inside-relativity-space-hq-3d-printer-rocket-factory-of-the-future.html>
- [27] NASA, “Vertical Assembly Center – Rocketology: NASA’s Space Launch System,” *blogs.nasa.gov*, Jun. 02, 2016. <https://blogs.nasa.gov/Rocketology/tag/vertical-assembly-center/>
- [28] AMFG, “How Topology Optimisation and 3D Printing Unlock New Design Opportunities,” *AMFG*, Apr. 19, 2018. <https://amfg.ai/2018/04/19/topology-optimisation-additive-manufacturing/>
- [29] Altair, “Enlighten Award Slide Module Winner,” 2018. Available: https://www.altair.com/es/pdf/enlighten/Enlighten_award_slide_module_Winner_BMW.pdf
- [30] D. Metal, “3D printed internal channels,” *Desktop Metal*. <https://www.desktopmetal.com/resources/internal-channels>

- [31] GE Additive, “New manufacturing milestone: 30,000 additive fuel nozzles,” *GE Additive*, 2018.
<https://www.ge.com/additive/stories/new-manufacturing-milestone-30000-additive-fuel-nozzles>
- [32] G. Menat, “With additive manufacturing, 20 conventional parts are now built as 1 single additive part in the CFM LEAP fuel nozzle. #GE #Innovation” Twitter,
https://twitter.com/GE_MENAT/status/815973497151324160
- [33] T. Cobbs , L. Brewer, and J. Crandall, “How 3D Metal Printing Saves Time and Lowers Costs: DED for Repair of Industrial Components,” Optomec. Available:
<https://optomec.com/wp-content/uploads/2019/03/DEDWebinar-slides.pdf>
- [34] B. Germann, “Direct Energy Deposition Saves Time & Lowers Costs 3D Metal Printing,” *Optomec*, Mar. 12, 2019.
<https://optomec.com/how-3d-metal-printing-saves-time-and-lowers-costs-ded-for-repair-of-industrial-components/>
- [35] America Makes, “America Makes COVID-19 Response Assessing the Role of Additive Manufacturing in Support of the U.S. COVID-19 Response,” Food and Drug Administration. Available:
<https://www.fda.gov/media/150615/download?attachment>
- [36] European Space Agency, “3D printing helps essential workers face COVID-19,” *www.esa.int*.
https://www.esa.int/About_Us/EAC/3D_printing_helps_essential_workers_face_COVID-19
- [37] Formlabs, “3D Printed COVID-19 Test Swabs,” *Formlabs*, 2018.
<https://formlabs.com/covid-19-response/covid-test-swabs/>
- [38] P. Verma, “How the 3D-printing community worldwide is aiding Ukraine,” *The Washington Post*. Available: <https://www.washingtonpost.com/technology/2022/06/12/3d-printers-ukraine-war-supplies/>

Capítulo 2:

Manufactura Aditiva por Medio de Arco de Alambre

2.1 ¿Qué es la Manufactura Aditiva por medio de Arco de Alambre?

En el capítulo 1 se dieron a conocer los diferentes tipos de manufactura aditiva que existen actualmente para la fabricación de piezas metálicas; a grandes rasgos se pueden clasificar de acuerdo con la forma en que el material base se encuentra (Ver figura 2.1).

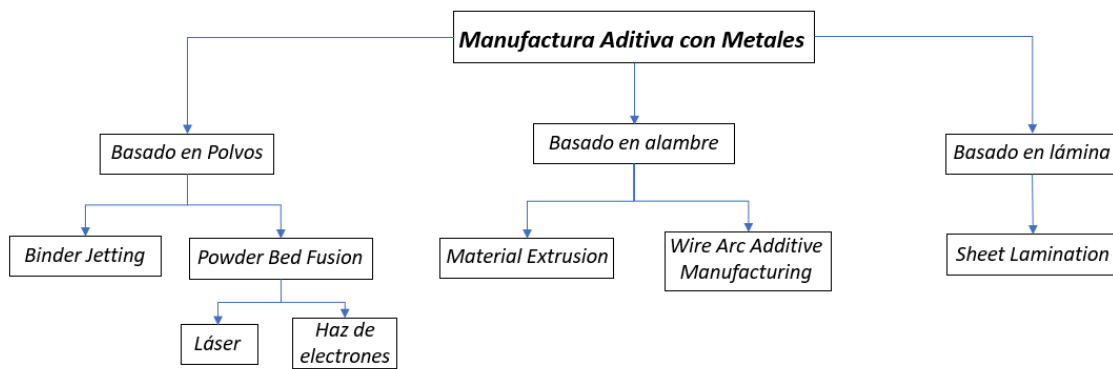


Figura 2.1. Organización de los procesos de manufactura vistos en esta obra de acuerdo con su material base.

La manufactura aditiva por medio de arco de alambre (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM), como su nombre lo dice, utiliza el material base a ser depositado como carretes de alambre metálico. Corresponde a un método de manufactura aditiva por medio de deposición directa de energía, en este caso la fuente de energía es un arco eléctrico, que va fundiendo el alambre metálico para ser depositado capa tras capa en la forma deseada, todo esto por medio de sistemas de control numérico (CNC) encargados de dar la dirección deseada de cada capa, ya sea por medio del procesamiento de un archivo CAD o la programación directa de las trayectorias de la máquina. Todo el proceso de deposición del metal se lleva a cabo en una atmósfera de gas inerte (generalmente Argón o CO₂) para evitar la oxidación del material depositado al entrar en contacto con la atmósfera [1].

La implementación de procesos WAAM se lleva a cabo mediante equipos de soldadura, la única diferencia es que, en vez de utilizar la soldadura para unir componentes, se deposita la soldadura capa tras capa para obtener la pieza nueva. La forma de clasificar los procesos de WAAM es de acuerdo con el tipo de proceso de soldadura que se esté realizando. Los tres procesos más utilizados son *Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)*, *Plasma Arc Welding (PAW)* y *Gas Metal Arc Welding (GMAW)*, éste último es el implementado en el proyecto de la presente tesis [2].

2.2) Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)

En este proceso se utiliza un electrodo de tungsteno no consumible, el cual crea un arco eléctrico estable al pasar un nivel de corriente constante, el arco eléctrico ioniza el aire dentro de esa zona, lo cual genera la temperatura suficiente para fundir el metal base que será depositado (ver figura 2.2). El material base se deposita sobre la trayectoria que va siguiendo el electrodo de tungsteno, siendo estos dos últimos sistemas independientes, lo cual brinda flexibilidad en poder colocar diferentes tipos de filamento a la vez y en diferentes posiciones alrededor del arco eléctrico. En este proceso se utiliza la protección de gases que ayudan a proteger el material depositado de óxidos, dichos gases suelen ser Argón, Helio o una mezcla de ambos, además, dentro de todos los procesos de manufactura aditiva vía WAAM éste es el más popular de todos [2],[3].

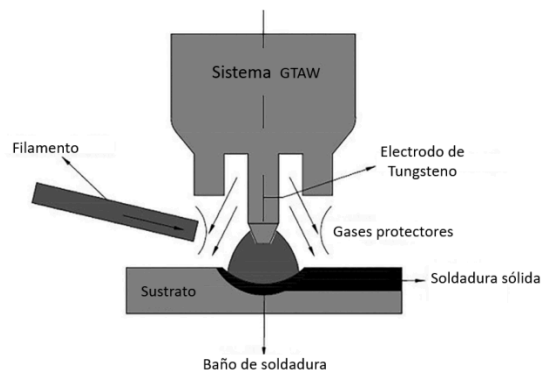


Figura 2.2. Componentes básicos de un sistema GTAW. Tomada y traducida de [2]

El calor que se obtiene en este proceso (y también en PAW) es función de la corriente y el voltaje de nuestro sistema, de tal forma que la corriente puede ser regulada manualmente mientras que el voltaje es función de la distancia entre el electrodo y el sustrato en donde será depositada la capa de filamento [4]. Dependiendo del tipo de material con el que se quiera trabajar se utilizan comúnmente 200 A en corriente directa o 500 A en corriente alterna, ésta última utilizada principalmente en metales como aluminio o magnesio, ya que la corriente alterna tiene la capacidad de remover óxidos dando como resultado una mejor calidad en la pieza final. Un problema que se puede dar en este tipo de procesos y el cual puede causar la discontinuidad del arco son las impurezas que se pueden obtener al entrar en contacto el electrodo con el baño de metal fundido, por lo cual se recomienda que estos dos no entren en contacto, además, la forma en que el filamento es alimentado (por delante de la trayectoria del electrodo de tungsteno o por detrás de la misma) tiene efectos en la estabilidad del proceso. Generalmente la deposición de filamento de frente a la trayectoria del electrodo es utilizada para aleaciones de acero y titanio, sin embargo, se debe tener conciencia de qué tipo de alimentación es más ventajosa para la trayectoria que se desea depositar. La tasa de deposición promedio de material en este proceso es de 1 a 2 kg/h [1],[3].

Recordando lo comentado en el capítulo 1, los procesos WAAM al ser pertenecientes al bloque de manufactura aditiva por deposición directa de energía tienen malos acabados superficiales al salir del proceso de impresión, por lo que se requiere de procesos posteriores de maquinado para poder generar la pieza final deseada (ver figura 2.3)

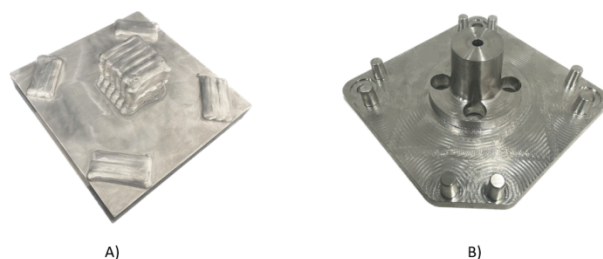


Figura 2.3. Componente impreso en aluminio por medio de un sistema GTAW por la empresa turca Alloy Additive. A) Pieza después de impresión. B) Pieza después de maquinado [5].

2.3) Plasma Arc Welding (PAW)

Es un sistema similar a GTAW en donde se parte de un electrodo no consumible de tungsteno el cual sirve para generar un arco de plasma (gas ionizado a elevada temperatura) dentro de una boquilla, la cual dirigirá dicho arco en un punto focalizado. El plasma sale de la boquilla a temperaturas y velocidades elevadas (según [6], suelen alcanzarse velocidades cercanas a un número de Mach 1 y unos 28000°C) y es generado por un arco eléctrico (ya sea entre el electrodo y la pieza de trabajo o el electrodo y la boquilla del sistema), el cual ioniza una corriente de gas inerte que fluye por la boquilla. En este proceso se siguen utilizando gases de protección para asegurar una mejor calidad de la pieza (ver figura 2.4) [3], [6].

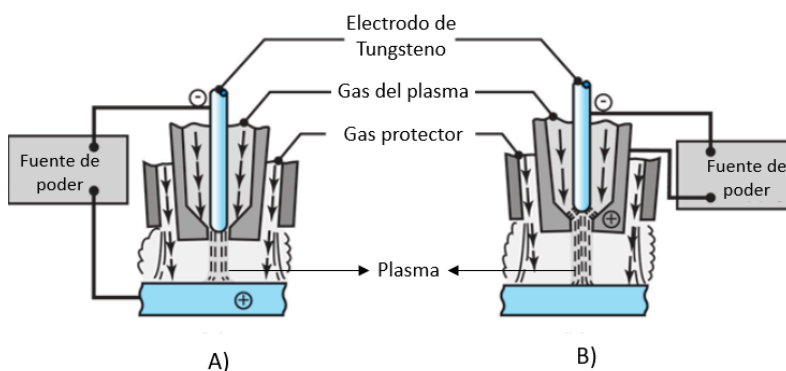


Figura 2.4. Los dos tipos de sistema PAW. A) El arco y plasma se forman entre el electrodo y la pieza de trabajo (conocido como método de arco transferido). B) El arco y plasma se forman entre el electrodo y la boquilla (conocido como método de arco no transferido, con el cual se tienen mayores penetraciones) Tomado, traducido y adaptado de [3].

El filamento del material que se va a depositar para la manufactura se coloca de la misma manera que en GTAW, por un sistema independiente que va alimentando con material la trayectoria del plasma que irá fundiendo el filamento y colocando las capas de material deseadas (ver figura 2.5). En este proceso se tiene una tasa de deposición promedio de 2 a 4 kg/h, la cual es mayor que en GTAW, sin embargo, la corriente utilizada en este proceso es menor, teniendo corrientes de operación generalmente menores a los 100 A [1], [3].

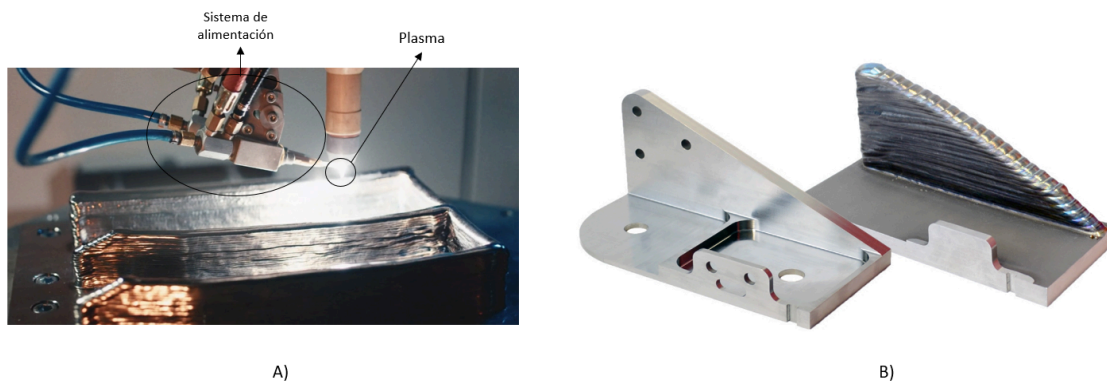


Figura 2.5. Manufactura aditiva por medio de PAW realizada en el sistema M3DP de la empresa austriaca SBI. A) El sistema consta de un sistema independiente de alimentación el cual va depositando el material siguiendo la trayectoria del plasma para ir colocando cada capa. B) Vista de una pieza para aplicación en la industria aeronáutica obtenida por medio de PAW antes y después del maquinado final [7], [8].

Algo que caracteriza a la manufactura aditiva vía WAAM (en cualquiera de sus 3 tipos) es que en las piezas finales se obtienen mejores propiedades mecánicas que aquellas de las piezas obtenidas por métodos convencionales de manufactura. Piezas de titanio y acero inoxidable obtenidas por PAW por la empresa SBI [8] han mostrado tener valores superiores de esfuerzo de fluencia y esfuerzo último a la tensión que sus contrapartes obtenidas por métodos convencionales (de acuerdo con normas ASTM y DIN) en forma de lámina o tocho de material. Además la dirección de la impresión de las piezas también tiene influencia en dichas propiedades mecánicas, pues en [9] se realizan distintas pruebas para aluminio, titanio, inconel y acero inoxidable por medio de PAW y GMAW, tomando muestras horizontales y verticales a la dirección de impresión, dando como resultado que todas las muestras tienen mejora en sus propiedades mecánicas en comparación con el material original obtenido por medio de sus respectivas normas, sin embargo, aquellas tomadas en dirección horizontal fueron superiores a las verticales.

2.4) Gas Metal Arc Welding (GMAW)

En este proceso de soldadura se cuenta con una alimentación constante de filamento del material que se va a soldar, rodeado de una atmósfera de gas inerte en la zona donde el arco eléctrico generará el calor suficiente para poder derretir el filamento e ir depositando la soldadura sobre el sustrato, tal y como se muestra en la figura 2.6 [10].

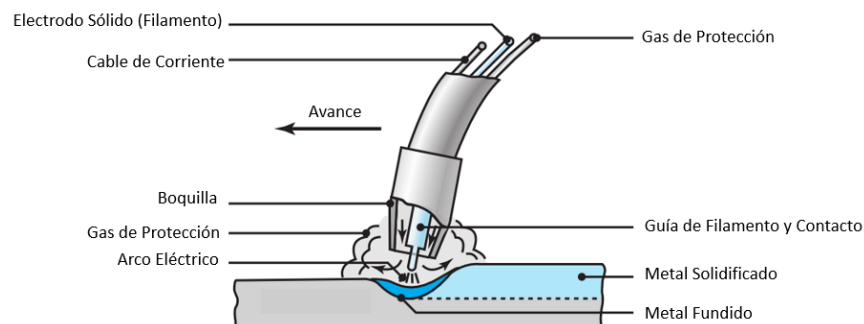


Figura 2.6. Elementos de un sistema de soldadura GMAW. El sistema es relativamente sencillo de automatizar, ya que el avance puede ser controlado por algún tipo de máquina CNC y los parámetros de corriente y flujo de gas se pueden preprogramar para obtener un proceso automatizado. Tomado y traducido de [3].

El proceso se desarrolló en la década de 1950 y originalmente se le conocía como MIG (por sus siglas en inglés Metal Inert Gas), haciendo referencia a la atmósfera de gas inerte que impide que el filamento depositado sobre el sustrato reaccione con el ambiente, provocando óxidos que requieran su posterior remoción. Esta característica es precisamente lo que hace este proceso idóneo para la manufactura aditiva, ya que, cada capa queda libre de óxidos superficiales que dificultan la adhesión metalúrgica de las capas subsecuentes. El potencial de la flexibilidad y automatización de éste proceso lo hace idóneo para poderse acoplar a tecnologías CAD/CAM, dando como resultado que casi cualquier máquina CNC o brazo robótico pueda ser adaptado junto con un sistema de soldadura GMAW (ver figura 2.7 A), además debido a que éste proceso se basa en sistemas de soldadura existentes, el costo y complejidad de la adaptación de un sistema de éste tipo es más sencillo que los demás sistemas vistos en el capítulo 1, ya que existe en el mercado una gran cantidad de sistemas comerciales de soldadura MIG; y lo más importante, diferentes aleaciones disponibles como filamento [3],[10].

Según [11] WAAM es un proceso que nos ofrece, a un bajo costo, una gran eficiencia en términos de volumen de producción, pues tiene en promedio una tasa de deposición de 15 - 30 [gr/min], esto lo hace flexible para poder producir piezas de grandes dimensiones, sin embargo, siguen siendo piezas “near net shape” que requieren post procesos de maquinado para llegar a su forma final (ver figura 2.7 B).

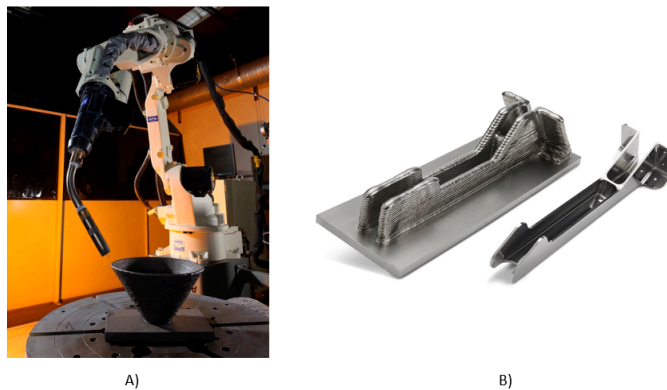


Figura 2.7 A) Sistemas de manufactura aditiva GMAW adaptado a un brazo robótico de la empresa TWI [12].

B) Pieza obtenida mediante proceso GMAW antes y después de un post proceso de maquinado. Nótese que la pieza antes de maquinar está mucho más cerca de su forma original que si se partiera de cero con un tocho de material sólido, lo cual hace que el proceso de maquinado sea mucho más eficiente [13].

Las piezas obtenidas son de excelentes propiedades mecánicas (lo cual lo vuelve un proceso idóneo para la reparación de componentes) ya que pueden llegar a ser comparadas con aquellas obtenidas mediante fundición, debido a que la naturaleza del filamento (completamente denso) no brinda la oportunidad de la generación de porosidades en la pieza (caso contrario de las piezas obtenidas mediante polvos metálicos, donde las porosidades son intrínsecas al proceso de sinterizado) [14]. La gran flexibilidad para producir piezas de pequeñas y grandes dimensiones con excelentes propiedades mecánicas lo han hecho un proceso que ha encontrado aplicaciones que van desde la arquitectura hasta la aviación (ver figura 2.8). En contraste a sus beneficios, GMAW es un proceso que genera elevadas temperaturas durante la aplicación del material en cada capa, por lo que se generan de forma inevitable esfuerzos residuales en la pieza final; es importante realizar tratamientos térmicos posteriores que remuevan dichos esfuerzos, sobre todo si la pieza está planeada para aplicaciones de alta demanda [12].

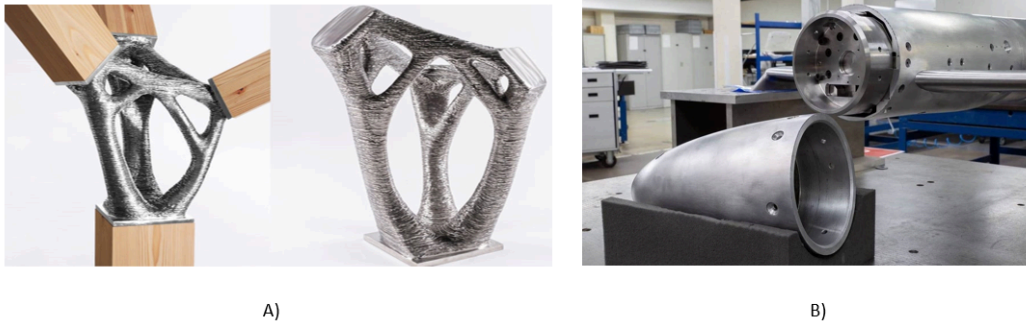


Figura 2.8 A) Conector de estructuras para la industria de la construcción realizado por la empresa Neerlandesa de manufactura aditiva MX3D y la empresa japonesa de construcción Takenaka. El conector realizado por medio de GMAW en acero dúplex, brinda alta resistencia a la corrosión y alta resistencia mecánica, aspectos claves en la industria de la construcción [15]. B) Cono de aeronave realizado por medio de GMAW en aluminio por la Aircraft Research Association de Inglaterra, logrando reducir en 74% el costo comparado con los procesos comunes de manufactura [16].

2.5) Física detrás del Proceso

WAAM es en esencia la automatización de un proceso de soldadura convencional MIG enfocado a seguir trayectorias de soldado en donde se deposita capa tras capa de soldadura para generar una pieza deseada. Entender la física de WAAM es entender la física detrás de un proceso de soldadura, el cual es un proceso que consta de múltiples fenómenos complejos simultáneos, hablamos de un proceso magneto-termo-hidrodinámico. Existen formas de modelar el proceso y obtener resultados muy cercanos a los experimentales [17], sin embargo, esto implica el uso de un modelo multi-física que está fuera del alcance de este trabajo. A continuación, se hará una descripción de los aspectos más fundamentales dentro de la vasta complejidad del proceso.

2.5.1) El Arco Eléctrico

Al referirnos a un proceso de manufactura aditiva por medio de deposición directa de energía (DED); es justo estudiar la naturaleza de dicha energía. Todo comienza con la formación de un arco eléctrico entre el sustrato y el filamento sólido, según el físico estadounidense Taylor Compton [18]:

“Un arco es una descarga de electricidad entre electrodos en un gas o vapor, que tiene una caída de voltaje en el cátodo del orden del potencial mínimo ionizante o mínimo excitante del gas o vapor”

Esto significa que, una adecuada caída de potencial en un gas puede generar una ionización capaz de generar temperaturas de hasta 5500°C, lo cual es suficiente para poder fundir la gran mayoría de aleaciones metálicas [10]. La caída de potencial se debe a la diferencia de polaridades entre un electrodo (la boquilla de una máquina de soldar) y una pieza de trabajo, lo que induce un campo capaz de acelerar electrones e iones positivos del gas, generando así un incremento de la energía cinética (temperatura) del sistema con las múltiples colisiones entre los elementos de carga opuesta [18], [19].

La generación de calor tan intensa e instantánea que genera un arco eléctrico lo hace una fuente muy eficiente para la soldadura por sobre otros métodos; al tener una concentración de calor tan abrupta y repentina en un metal hay menos posibilidades de que parte del calor generado puede “escapar” y ser

conducido por toda la pieza de trabajo, en vez de ser utilizado para realizar la fusión del metal.

En contraste, si quisiéramos fundir el metal con la flama de un soplete (por ejemplo) la transferencia de calor sería más lenta, propiciando que antes de obtener el cambio de fase del metal, tengamos una conducción por todo el cuerpo, perdiendo eficiencia en el proceso (es importante notar que todo esto es función también de la conductividad térmica de nuestro metal en cuestión).

Procesos como el haz de electrones se consideran con un 100% de eficiencia, pues la generación de calor es muy rápida y focalizada, haciendo un proceso muy eficiente en términos energéticos.

En arco eléctrico se siguen teniendo pérdidas (por radiación y por la generación de chispas) sin embargo, es un proceso que otorga una alta focalización de energía un menor costo, por ello se considera un proceso idóneo para WAAM, en donde se tienen múltiples capas de soldadura [20].

2.5.2) Flujo de Calor en WAAM

Dado que el arco eléctrico es una fuente de calor intensa, cuando la boquilla del sistema inicia el proceso (en un punto inicial) se tiene un incremento rápido en la temperatura y conforme se vaya moviendo para depositar el filamento la temperatura de ese punto inicial irá disminuyendo gradualmente. Sin embargo, una vez inicia a moverse la fuente de calor del punto inicial, los puntos cercanos que siguen en su trayectoria comienzan a experimentar el mismo proceso de incrementar rápido la temperatura, sin embargo, se llega a obtener un punto cuasi-estacionario de temperatura, debido a que los alrededores de la trayectoria de soldado ya tienen una temperatura que favorece el equilibrio. En la figura 2.9 se ilustra este concepto con una serie de termocoples posicionados a lo largo de una trayectoria de soldadura [19].

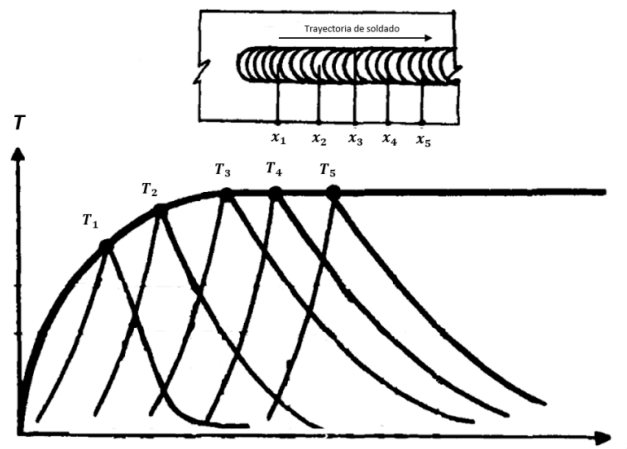


Figura 2.9 Medidas de la temperatura máxima obtenida en una serie de posiciones definidas a lo largo de un cordón de soldadura. Las medidas se caracterizan por un abrupto aumento a la temperatura máxima (la cual se mantiene por muy poco tiempo) seguido por un descenso rápido de la temperatura. Poco tiempo después de iniciado el proceso se obtiene un proceso cuasi estacionario de la temperatura máxima. Tomado y modificado de [19].

La condición cuasi-estacionaria de la temperatura es el resultado de un equilibrio entre la energía suministrada en el proceso y las pérdidas energéticas por conducción a las zonas de menor temperatura de la pieza de trabajo, por lo tanto, se considera que la zona que rodea la fuente de calor en su trayectoria es isotérmica [19].

El proceso de transferencia de calor en un proceso de soldadura es gobernado por la ecuación general de calor para fuentes móviles [21]. Considerando que en este proceso no tenemos generación de calor

interna, tenemos:

$$\rho(T)C(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k(T)\frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k(T)\frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(T)\frac{\partial T}{\partial z} \right) - \rho(T)C(T) \left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.1)$$

Tal que:

T : Temperatura de soldadura [K]

x : Coordenada en dirección del proceso de soldadura [mm]

y : Coordenada en dirección transversal a la dirección del proceso de soldado [mm]

z : Coordenada normal a la superficie soldada [mm]

$C(T)$: Calor específico del metal en función de la temperatura [J/g⁻¹ K⁻¹]

$k(T)$: Conductividad térmica del metal en función de la temperatura [J/mm s⁻¹ K⁻¹]

$\rho(T)$: Densidad en función de la temperatura [g/mm³]

$\langle v_x, v_y, v_z \rangle$: Componentes de la velocidad de soldadura [mm/s]

A pesar de la complejidad del modelo matemático, en la actualidad en la mayoría de los casos es posible modelar el comportamiento del flujo de calor gracias a métodos computacionales que pueden ofrecer soluciones numéricas, sin embargo, es posible también realizar simplificaciones en términos de la ecuación general del calor para resolverla.

Rosenthal [22] propuso una de las soluciones simplificadas del modelo más utilizadas, considerando lo siguiente:

- 1) Las propiedades térmicas del metal (ρ , C y k) son constantes
- 2) La entrada de calor en el proceso se concentra en un solo punto y es uniforme (no varía respecto a t), con una velocidad constante v sobre la coordenada x de un sistema rectangular de coordenadas

Asumir que las propiedades térmicas no varían con la temperatura no es lo ideal ya que esto no sucede en la realidad, sin embargo, nos otorga una simplificación lo suficientemente buena para poder entender la naturaleza del proceso. Para poder simplificar más la ecuación Rosenthal propone un sistema de coordenadas móviles, definiendo la variable $\xi = x - vt$ (ver figura 2.10):

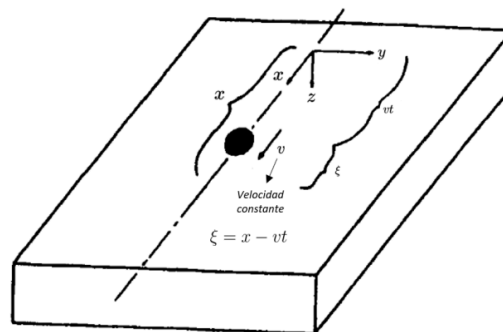


Figura 2.10 Sistema de coordenadas rectangulares y definición de coordenada móvil ξ . Tomado y modificado de [19].

Considerando ahora las propiedades térmicas constantes y que sólo hay variación respecto a la coordenada x , la ecuación 2.1 se simplifica a:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \rho C \left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2.2)$$

Aplicando regla de la cadena, tenemos:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial \xi}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial \xi} \right) \quad (2.3) \quad \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial \xi}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial \xi} \right) \quad (2.4)$$

Diferenciando ξ :

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -v \quad (2.5) \quad \frac{\partial \xi}{\partial x} = 1 \quad (2.6)$$

Tenemos entonces:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -v \frac{\partial T}{\partial \xi} \quad (2.7) \quad \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial \xi} \quad (2.8) \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} \quad (2.9)$$

Considerando $v_x = v$ y sustituyendo las ecuaciones 2.7, 2.8 y 2.9 en la ecuación 2.2 tenemos:

$$\begin{aligned} k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) &= \rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C v \frac{\partial T}{\partial x} \\ k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) &= (-\rho C) \left(-\frac{\partial T}{\partial \xi} \right) + (-\rho C) \left(-v \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) \\ k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) &= -\rho C v \left(\frac{\partial T}{\partial \xi} \right) - \rho C \left(\frac{\partial T}{\partial \xi} \right) \end{aligned}$$

Considerando que la temperatura no varía respecto al tiempo (debido a la condición cuasi-estacionaria de los ciclos térmicos):

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = -\frac{\rho C v}{k} \left(\frac{\partial T}{\partial \xi} \right) \quad (2.10)$$

Y dado que el término izquierdo de la ecuación 2.10 corresponde al operador Laplaciano de la temperatura, obtenemos entonces la ecuación de calor simplificada [19], [21], [22]:

$$\nabla^2 T = -\frac{\rho C v}{k} \left(\frac{\partial T}{\partial \xi} \right) \quad (2.12)$$

Conociendo la relación entre temperatura y tiempo del proceso y un proceso 2D, es posible obtener una solución de la ecuación 2.12 que nos permite observar la naturaleza de la distribución de temperatura del proceso [19]:

$$T = T_0 + \frac{\left(\frac{q}{v}\right)}{d(4\pi k C \rho t)^{\frac{1}{2}}} e^{\frac{-r^2}{4t\alpha}} \quad (2.13)$$

Donde:

T_0 : Temperatura inicial [K]

d : Profundidad de la soldadura [mm]

α : Difusividad térmica [m/s²]

$r = z^2 + y^2$: Distancia radial desde el punto de soldadura [mm]

La figura 2.11 muestra el gráfico de esta solución, la temperatura tiene una forma similar a una campana con su punto más alto en la zona donde se genera el arco con una disminución gradual en la zona trasera a la trayectoria del proceso.

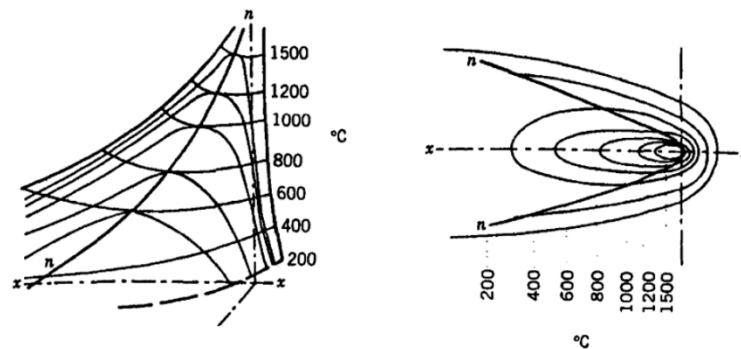


Figura 2.11 Solución de Rosenthal para el flujo de calor en un proceso de soldadura en 2 dimensiones. La distribución de temperaturas juega un papel importante en la generación de esfuerzos residuales (lo cual será estudiado en la siguiente sección) [19].

2.5.3) Esfuerzos Residuales

La solución de Rosenthal nos deja ver que en un proceso de soldadura la distribución de temperatura no es uniforme, tenemos un punto donde se concentra la temperatura máxima mientras los alrededores se mantienen a una temperatura mucho más baja, cada cambio de temperatura en un metal tiene asociado una deformación (ya sea una expansión o contracción térmica). Cuando el cambio de temperatura es uniforme en todo el material, la deformación también lo será; cada parte del metal es capaz de expandirse y/o contraerse sin interferir entre sí, todo al mismo “ritmo”. Cuando existe un cambio no uniforme en la temperatura, las deformaciones tampoco serán no uniformes, dando como resultado que las regiones de material que tiendan a expandirse no puedan hacerlo libremente por las zonas con una temperatura diferente, las cuales tendrán asociadas diferentes deformaciones que les impida realizar la misma deformación; el resultado del “choque” de deformaciones es la generación de esfuerzos residuales [19], [20].

Los esfuerzos residuales son internos al material, al aplicar una carga y posteriormente removerla seguirán estando ahí; pueden jugar un papel crucial en muchos materiales, ya que se suman vectorialmente a los esfuerzos aplicados por cargas externas [19], puede ser ventajoso al poder contrarrestar el efecto de

esfuerzos externos que puedan ser muy elevados, dando el efecto de contrarrestarlos, pero también pueden ser catastróficos al poder “restar” resistencia a una estructura, ya que también se pueden sumar.

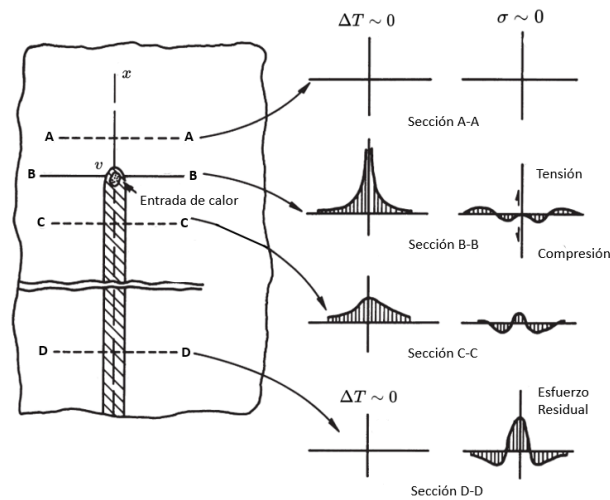


Figura 2.12) Generación de esfuerzos residuales en un proceso de soldadura con arco a una velocidad v . La región sombreada corresponde a la zona donde ocurre deformación plástica debida al calor de la soldadura, la elipse donde se marca la entrada de calor es la zona de material fundido. Modificado y traducido de [20].

La figura 2.12 muestra el comportamiento de la distribución de esfuerzos en un proceso de soldadura, se divide el sistema en cortes perpendiculares a la trayectoria de la soldadura:

- 1) **Sección A-A:** Debido a que solo se experimenta un leve incremento de temperatura por conducción de la fuente de calor (la cual aún no llega a esa zona) la deformación y el esfuerzo asociado son prácticamente nulos.
- 2) **Sección B-B:** Corresponde al punto donde se tiene el máximo aumento en la temperatura (donde está el arco), el esfuerzo generado en esta región es muy pequeño, ya que el metal fundido, al ser un fluido en ese instante, no puede soportar cargas.
- 3) **Sección C-C:** La temperatura ha disminuido (el metal es sólido de nuevo) causando que la zona sombreada pasa ahora a contraerse, dando como respuesta esfuerzos de tensión, como consecuencia, los esfuerzos en los alrededores se vuelven de compresión para balancear el sistema en esa zona.
- 4) **Sección D-D:** Se amplifican los efectos de la sección C-C, la temperatura disminuye aún más aumentando los esfuerzos de tensión centrales a la trayectoria de soldado y aquellos de compresión también crecen para mantener el balance en esa zona.

Los esfuerzos no solo existen en planos perpendiculares a la trayectoria de soldadura, sino también en planos paralelos y con una distribución similar. Si la pieza que está siendo soldada no está correctamente anclada (restringida) de modo que pueda contrarrestar el efecto de los esfuerzos residuales, estos harán que al enfriar la pieza se generen deformaciones (distorsiones) ocasionando un cambio de la geometría inicial (ver figura 2.13). [19], [20].

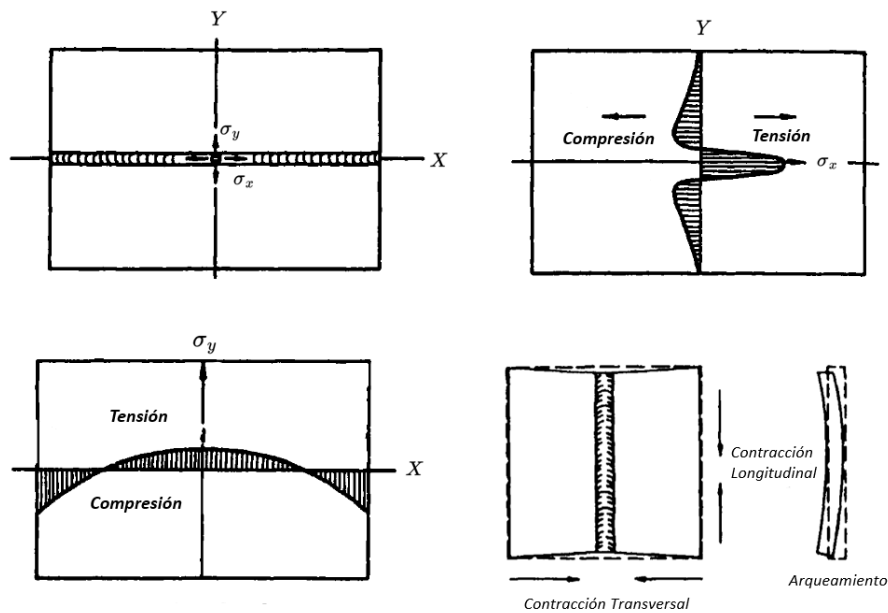


Figura 2.12) Generación de esfuerzos residuales en un proceso de soldadura con arco a una velocidad v . La región sombreada corresponde a la zona donde ocurre deformación plástica debida al calor de la soldadura, la elipse donde se marca la entrada de calor es la zona de material fundido. Modificado y traducido de [20].

2.5.4) Flujo del Material Fundido

Existe una relación directa entre la forma en que el flujo del material fundido se desarrollará y la distribución de temperaturas. El proceso es complejo, pero puede ser estudiado separando el flujo del material en el arco eléctrico y el flujo de material una vez que es depositado y mientras va solidificando, además, las fuerzas impulsoras no solo tienen un origen mecánico, sino que también son de origen eléctrico.

La corriente que fluye por el gas para generar el arco eléctrico induce un campo magnético perpendicular a su trayectoria; la interacción entre este campo magnético y el flujo de corriente eléctrica da como resultado una fuerza eléctrica conocida como fuerza de Lorentz. Las 3 cantidades descritas son vectores perpendiculares entre sí (es decir $\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}$, donde $\vec{F}$ es la fuerza de Lorentz, $\vec{J}$ es el vector de densidad de corriente y $\vec{B}$ es el vector de flujo magnético).

La fuerza de Lorentz en un proceso de soldadura apunta hacia el eje donde el arco se va depositando (ver figura 2.13) y es lo suficientemente fuerte para dirigir hacia esa zona el flujo del gas ionizado y del material fundido [23].

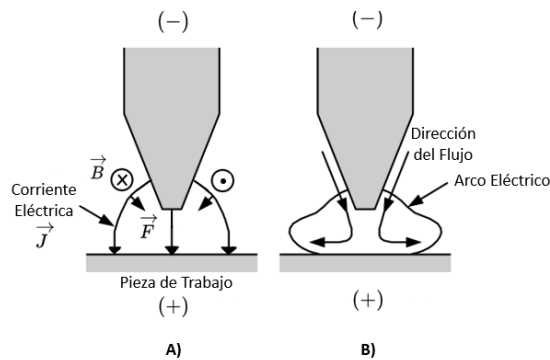


Figura 2.13 Efecto de la fuerza de Lorentz en el flujo durante un proceso de soldadura, para ilustrar se toma como ejemplo un electrodo de tungsteno de soldadura TIG creando un arco con la pieza de trabajo. A) La corriente fluye de la punta del electrodo a la pieza de trabajo creando un campo magnético perpendicular al plano mostrado (del lado izquierdo “sale” mostrado por un punto, mientras del lado derecho “entra” mostrado con la x), la fuerza es un vector perpendicular a ambos apuntando al eje del electrodo. B) La fuerza mueve el flujo del gas ionizado a seguir la trayectoria mostrada. Modificado y traducido de [23].

Una vez que el material es depositado, mientras comienza el proceso de solidificación existe una serie de fuerzas que hacen que la zona de material fundido siga experimentando movimiento, lo cual va a influir directamente en la forma en que el material va a solidificar. Existen 2 fuerzas que hacen que el flujo se genere en forma de remolinos internos y 2 fuerzas que generan esfuerzos cortantes en la superficie (figura 2.14) [23]:

Fuerza de Flotación: A pesar de que en la solución de Rosenthal consideramos que las propiedades no cambian en función de la temperatura, solo fue una suposición hecha para poder simplificar las matemáticas; en el proceso real las propiedades si son función de la temperatura y una de las más importantes es la densidad (pues tienen una relación inversamente proporcional). Debido a que la zona intermedia de la trayectoria de soldadura es la de mayor temperatura, en esa zona se tendrá por consecuencia una menor densidad del metal fundido, mientras que las zonas fundidas más alejadas experimentarán el caso contrario. La fuerza de gravedad tomará acción sobre los puntos de mayor densidad haciendo que esa zona genera un flujo hacia adentro de nuevo en dirección de la zona de mayor temperatura (ver figura 2.14 A).

Fuerza de Lorentz: Mencionada al inicio de esta sección además de generar efectos en el flujo de fluido del arco también lo hace sobre el material depositado, ya que la corriente eléctrica cierra el circuito en el material de trabajo donde el metal fundido es depositado. En este caso, la fuerza genera un flujo similar al de la fuerza de flotación, pero en dirección opuesta (ver figura 2.14 B).

Esfuerzo Cortante Debido a Gradiente de Tensión Superficial: Cuando no existen sustancias que reducen la tensión superficial de un fluido (surface active agents) la temperatura y la tensión superficial tienen una relación inversamente proporcional, por ende, la zona media donde se tiene la mayor temperatura tienen menor tensión superficial que la que está más alejada (se tiene un gradiente en la tensión superficial), y como consecuencia se tiene un esfuerzo cortante que obliga al fluido a moverse en la superficie del centro hacia las orillas (ver figura 2.14 C).

Esfuerzo Cortante Debido al Arco eléctrico: El flujo de gas ionizado producto de la fuerza de Lorentz en el depósito de material (figura 2.13) al encontrarse con la zona de material depositado

induce un esfuerzo cortante en la misma dirección y con los mismos efectos que el del gradiente de tensión superficial (ver figura 2.14 D).

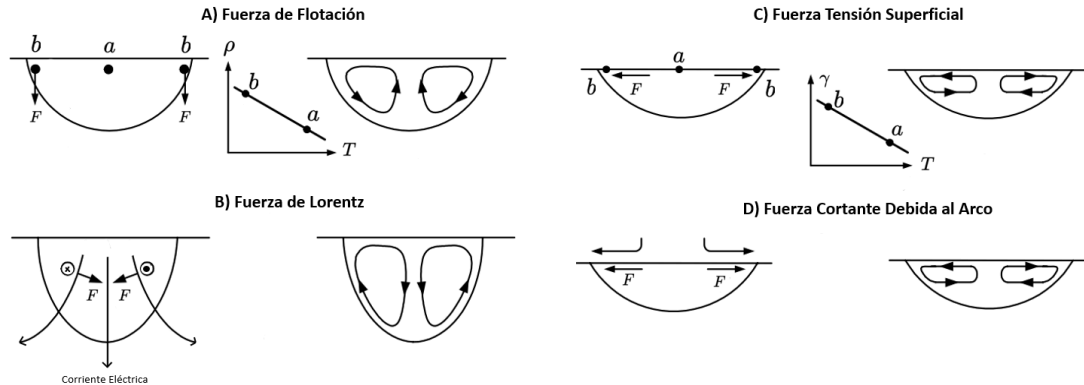


Figura 2.14 A) Los puntos b se encuentran con una mayor densidad que el punto a , lo que genera el patrón de flujo del lado derecho. B) La fuerza perpendicular a la corriente y al flujo magnético genera un flujo en remolino del material fundido. C) Los puntos b tienen una mayor tensión superficial que el punto a lo que genera el patrón de flujo mostrado. D) El flujo de gas ionizado proveniente del arco al encontrarse con el material fundido genera un esfuerzo cortante que genera un flujo similar al del punto C. Modificado y traducido de [23].

Fuentes

- [1] V. T. Le and T. K. Doan, "Wire Arc Additive Manufacturing Process Overview and a Case Study on Low-Carbon Steels," in *Wire Arc Additive Manufacturing*, S. Rathee and M. Srivastava, Eds., CRC Press, 2024, pp. 25, 39. Available: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003363415-2/wire-arc-additive-manufacturing-van-thao-le-tat-khoa-doan>
- [2] T. Goswami, S. Biswas, S. Das, and M. Mukherjee, "An overview of wire arc additive manufacturing (WAAM) technique with different alloys in modern manufacturing industries," in *Hybrid Metal Additive Manufacturing Technology and Applications*, P. Shrivastava, A. Dhanola, and K. Kumar, Eds., CRC Press, 2024, pp. 19, 29. Available: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003406488-2/overview-wire-arc-additive-manufacturing-waam-technique-different-alloys-modern-manufacturing-industries-tuhina-goswami-shatarupa-biswas-santanu-das-manidipto-mukherjee>
- [3] S. Kalpakjian, *Manufacturing Engineering And Technology*. S.L.: Pearson Education Limited, 2013.
- [4] P. Peyre and E. Charkaluk, *Additive Manufacturing of Metal Alloys 1*. John Wiley & Sons, 2022.
- [5] Alloy Additive, "Wire Arc Additive Manufacturing" <https://alloyadditive.com/>
- [6] M. Srivastava, S. Rathee, A. Tiwari, and M. Dongre, "Wire arc additive manufacturing of metals: A review on processes, materials and their behavior," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 294, p. 126988, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126988>

- [7] SBI International, “M3DP industrial line SBI GmbH” <https://www.sbi.at/en/products/plasma-additive-manufacturing/m3dp-industrial-line>
- [8] SBI International, “ M3DP: Parts and Demonstrators by Plasma Metal Deposition”, SBI, Available: https://www.sbi.at/media/pages/products/plasma-additive-manufacturing/m3dp-industrial-line/8a50736657-1676660072/2021_pmd-applications.pdf
- [9] A. Suárez, E. Aldalur, F. Veiga, T. Artaza, I. Tabernero, and A. Lamikiz, “Wire arc additive manufacturing of an aeronautic fitting with different metal alloys: From the design to the part,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 64, pp. 188–197, Apr. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.01.012>
- [10] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing*. John Wiley & Sons, 2015.
- [11] K. E. K. Vimal, M. Naveen Srinivas, and S. Rajak, “Wire arc additive manufacturing of aluminum alloys: A review,” *Materials Today: Proceedings*, Oct. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.153>.
- [12] “Wire and Arc Additive Manufacturing,” *Twl-global.com*, 2019. <https://www.twl-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/arc-based-additive-manufacturing-137>
- [13] “WAAM! What Is Wire Arc Additive Manufacturing?,” *All3DP Pro*, Mar. 24, 2022. <https://all3dp.com/1/waam-what-is-wire-arc-additive-manufacturing/>
- [14] Spwebconnect, “What is Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)?,” *3dsculplab.xyz*, 2022. <https://www.3dsculplab.xyz/Blog/post/What-is-Wire-Arc-Additive-Manufacturing>
- [15] ENGINEERING.com, “MX3D, Takenaka Use WAAM to Create Steel Connector for Construction «Fabbaloo,” *Fabbaloo*, Mar. 08, 2021. <https://www.fabbaloo.com/news/mx3d-takenaka-use-waam-to-create-steel-connector-for-construction>
- [16] “ARA Nose Cone,” *Waam3d.com*, 2020. <https://www.waam3d.com/case-studies/ara-nose-cone>
- [17] W. Zhao, S. Tashiro, A. B. Murphy, M. Tanaka, X. Liu, and Y. Wei, “Deepening the understanding of arc characteristics and metal properties in GMAW-based WAAM with wire retraction via a multi-physics model,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 97, pp. 260–274, Jul. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.05.008>
- [18] K. T. Compton, “The Electric Arc,” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. XLVI, pp. 868–883, Jan. 1927, doi: <https://doi.org/10.1109/t-aiee.1927.5061428>
- [19] R. W. Messler, *Principles of Welding*. John Wiley & Sons, 2008.
- [20] American Welding Society, *WELDING HANDBOOK : Volume 1 Fundamentals of Welding* . 2013.
- [21] M. B. Nasiri and N. Enzinger, “Powerful analytical solution to heat flow problem in welding,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 135, pp. 601–612, Sep. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.08.003>.

[22] D. Rosenthal, "The Theory of Moving Sources of Heat and Its Application to Metal Treatments," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 68, no. 8, pp. 849–865, Nov. 1946, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4018624>.

[23] S. Kou, *Welding Metallurgy*. John Wiley & Sons, 2003.

Capítulo 3:

Metodología Experimental (Obtención de los Productos)

3.1) Acero ER-70S-6

Para poder comenzar con la experimentación se optó por un microalambre comercial de bajo costo que pueda ser soldable con la mayoría de los aceros al carbono comerciales, que tenga buen acabado superficial libre de impurezas (debido a que se van a soldar múltiples capas) y que posea buenas propiedades mecánicas, todo esto con la finalidad de serle fiel a la flexibilidad y calidad del proceso para la manufactura de nuevos componentes o para reparaciones. Por estas necesidades, la opción que se decidió tomar fue el microalambre ER-70S-6.

El microalambre sólido ER70S-6 lleva su nombre de acuerdo con la clasificación asignada por la American Welding Society (AWS) en su estándar A5.18/A5.18M:2021 (ver figura 3.1), el cual se encarga de garantizar que microalambres y electrodos comerciales cumplan con criterios de resistencia mecánica, composición química, marcado y embalaje de calidad [1],[2].



Figura 3.1) Nomenclatura y composición química del Acero ER70S-6. Tomado y modificado de [2].

La composición química del microalambre hace que tenga una buena calidad en sus propiedades mecánicas, pues el silicio junto con el manganeso reacciona con el oxígeno disuelto en el material fundido llevándolo a la superficie para formar escoria, reduciendo así posibles porosidades que el oxígeno pueda formar y mejorando notablemente las propiedades mecánicas [3]. Según la ficha técnica del fabricante [4] es un material que se puede utilizar con cualquier acero al carbono comercial incluso si este presenta corrosión o residuos de pintura o grasa, es un material que por su presentación (en carrete continuo) brinda una alimentación constante que nos será útil para poder automatizar nuestro proceso, además de ser una alternativa económica y brindar una alta calidad de soldadura y ser utilizada en aplicaciones donde se requieren múltiples capas de material soldado[4].

3.2) Equipo Experimental

Para poder manufacturar nuestras piezas de forma automatizada se trabajará con una máquina de soldadura multiproceso Trilogía 200i de la marca Infra, acoplando la antorcha al cabezal de un Router CNC para poder controlar las trayectorias de soldado, así como dar la instrucción de inicio y fin de soldadura. El arreglo físico de los sistemas y todos sus componentes se muestran en la figura 3.2, el tipo de sistema es similar a aquellos descritos para DED en el capítulo 1, donde ambos trabajan mediante la automatización del proceso por medio de una máquina CNC. Todo el equipo de trabajo pertenece a la UNAM y ha sido previamente ensamblado para poder obtener la automatización del proceso.

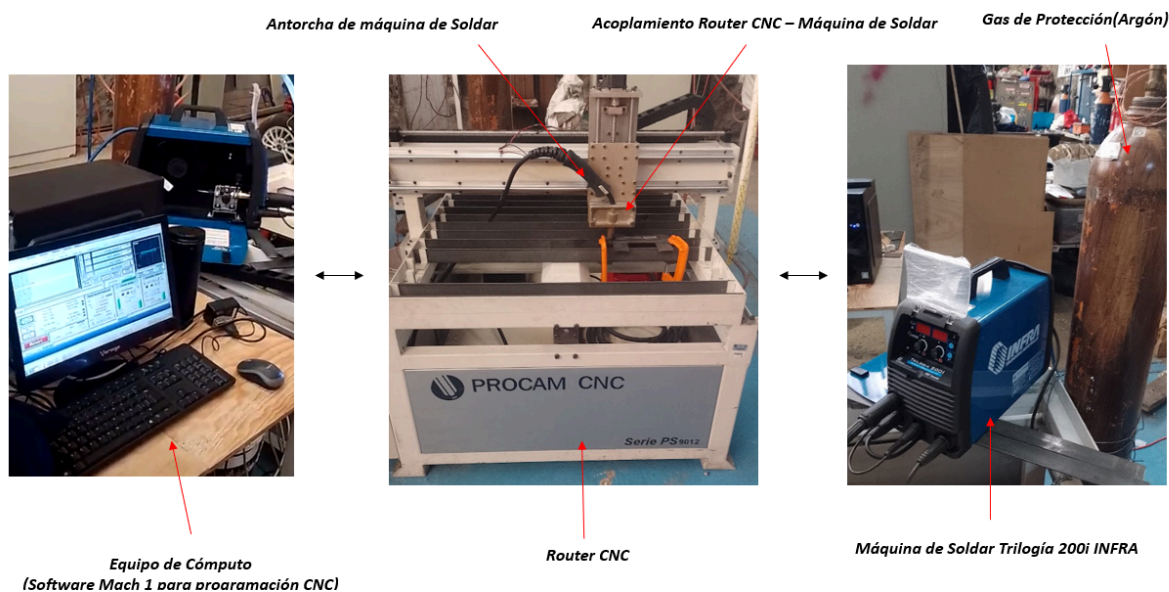


Figura 3.2) Componentes del sistema de manufactura aditiva WAAM empleado en la elaboración de las probetas. Para acoplar la antorcha de la máquina de soldar se empleó un par de bridas hechas por fundición acopladas de tal modo que el eje de la boquilla coincida con el cero de nuestra máquina CNC.

Dentro del proceso de manufactura aditiva se parte primero de la generación de un modelo 3D en un software CAD; en este caso se realizó una probeta de tensión y de impacto, tomando todas nuestras dimensiones nominales las indicadas en la norma ASTM E8M-04 (las cuales se estudiarán a detalle más adelante). Sabiendo de antemano que WAAM es un proceso que requiere un maquinado posterior, lo único que nos interesa en este punto es acercarnos lo más posible a dichas dimensiones finales, sin ser tan estrictos.

Una vez tengamos el modelo 3D se procesa su correspondiente código G y M para poder programar en nuestro equipo de cómputo. El proceso que se desea simular es el de fresado CNC, solo que, en este caso en vez de tener un cortador que irá cortando material al girar el husillo en las trayectorias programadas, obtendremos una boquilla de soldar que irá depositando material sobre dichas trayectorias. El inicio de depósito y fin de material (accionamiento de la antorcha) se realiza por medio de un circuito eléctrico previamente diseñado, que toma como referencia el correspondiente código M para activar o desactivar el circuito de encendido de la antorcha.

El sustrato utilizado para todas nuestras pruebas es una solera comercial, ya que nuestro electrodo puede soldarse en cualquier acero al carbono. Se cortaron múltiples segmentos de la misma medida y fueron ajustadas 2 láminas por prueba como se muestra en la figura 3.3. La razón de utilizar 2 láminas corresponde a la excesiva distorsión causada por esfuerzos residuales en nuestras piezas.

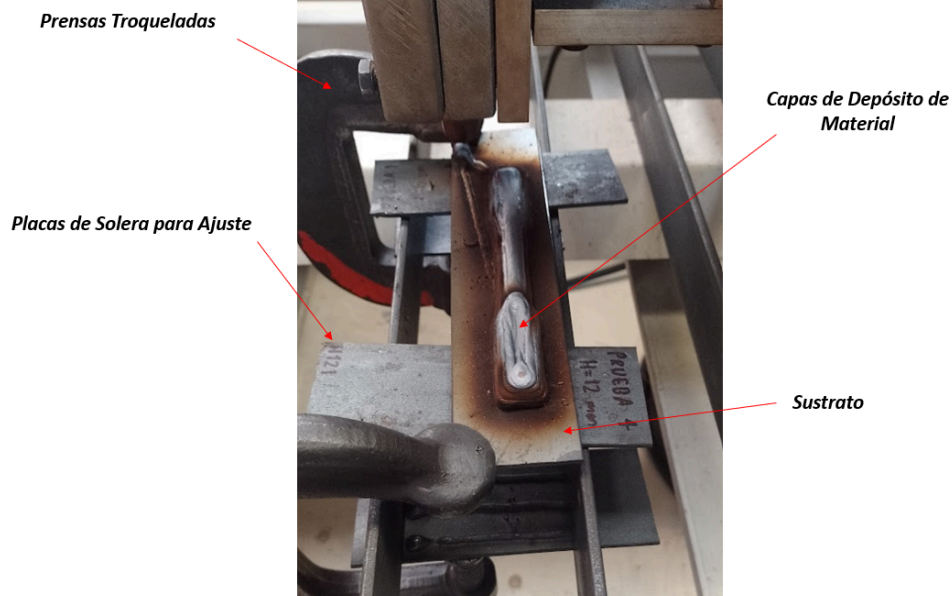


Figura 3.3) Sistema de ajuste para el sustrato. Cuando se coloca una única placa de solera como sustrato se genera una deformación muy notable, para reducir este efecto se optó por utilizar una segunda capa inferior que servirá de soporte para ayudar a reducir los esfuerzos residuales.

La máquina de soldar con la que trabajaremos es el modelo Trilogía 200i de la Marca Infra, la cual posee las características de la figura 3.4. El equipo adquirido para poder realizar las experimentaciones cuenta con un costo bajo y unas características óptimas para poder ser colocada en cualquier posición dentro de nuestro Router CNC, lo cual nos favorece mucho para poder acoplar de mejor manera la antorcha, obteniendo así un acomodo espacial ventajoso, donde solo se requiere el espacio de la máquina CNC, el tanque de gas Argón y el equipo de cómputo. Otra ventaja del equipo de soldadura es que cuenta con un sistema de alimentación por carrete de forma continua, dando pie a poder automatizar de una manera más eficiente nuestro proceso.



INFRA Trilogía 200i:

- Multiproceso (MIG, TIG y electrodo revestido).
- 35-210 [A] de corriente de soldadura a 220[V] corriente directa de alimentación.
- Voltaje máximo de 60[V] en corriente directa.
- Soldadura MIG en diámetros de 0.6 a 0.9 [mm] en acero al carbono, acero inoxidable y aluminio .
- Dimensiones (mm): Alto 345, ancho 210 y largo 490.
- Peso neto de 15[kg].

Figura 3.4) Características del equipo de soldadura [5].

3.3) Proceso de Impresión 3D

El proceso de manufactura aditiva sigue un flujo similar al de una pieza que será sometida a un proceso de manufactura sustractiva (maquinado) vía CNC. Toda pieza comienza por un modelo CAD, el cual será post procesado para obtener las trayectorias de recorrido de nuestra herramienta de corte en una serie de códigos M y G (los cuales son generados de forma automática por módulos dentro del software CAD más comerciales). Una vez obtenido el código de nuestra pieza se debe de programar en nuestra máquina CNC y preparar la muestra junto con nuestro cortador para poder iniciar con la fabricación del componente. Para el caso de un proceso de maquinado se suele colocar el bloque de material en las prensas de la fresadora (o la barra de material en el chuck del torno), se coloca el cortador que se vaya a utilizar para dar forma a la operación deseada, se referencia un cero pieza (lugar a partir de donde iniciará el recorrido de las trayectorias de nuestro código) y posteriormente se da lugar a iniciar el proceso.

En nuestro caso se lleva el mismo proceso, solo que, en vez de colocar nuestra barra de material en las prensas, colocamos nuestra lámina de solera sobre nuestras prensas troqueladas (tal y como se muestra en la figura 3.3) y de igual modo referenciamos el cero pieza tomando como referencia la punta del microalambre que sale de la antorcha al colocarlo en la máquina y que esté lista para soldar (ver figura 3.5).

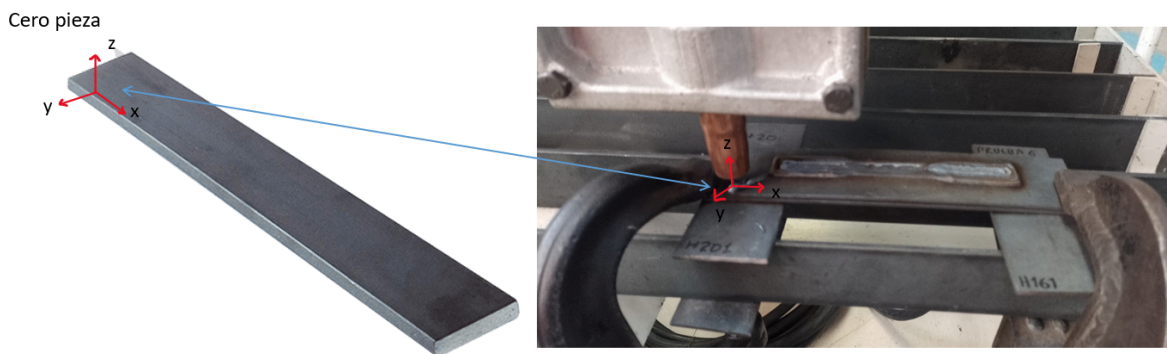


Figura 3.5) Designación del cero pieza designando un sistema de referencia a partir de dicho punto.

Para poder realizar una pieza de calidad se tomó como criterio lograr obtener una estabilidad del arco modificando el voltaje, corriente y velocidad de avance de la máquina, además de mantener un flujo de gas argón de 0.12 [l/s]. Al iniciar a hacer pruebas de soldadura se obtenían 2 problemas recurrentes, el arco era muy inestable en lapsos de tiempo muy rápidos, lo cual generaba pulsaciones muy rápidas de calor que daban por resultado un cordón muy irregular) o se generaba una deposición de material descontrolada que generaba un goteo caótico de material fundido. Se hicieron aproximadamente más de 100 ajustes de parámetros para poder lograr un cordón estable de soldadura (ver figura 3.6) y se llegó a la conclusión que los parámetros óptimos de trabajo (figura 3.7) que generan un cordón de buena calidad son:

- 35 volts
- 80 amperes
- Alimentación de Argón de 0.12[l/s]
- Velocidad de Alimentación del Carrete de Soldadura de 15[m/min]
- Avance de Boquilla de Soldadura 1.1[m/min]
- Altura entre Antorcha y Sustrato de 8[mm]

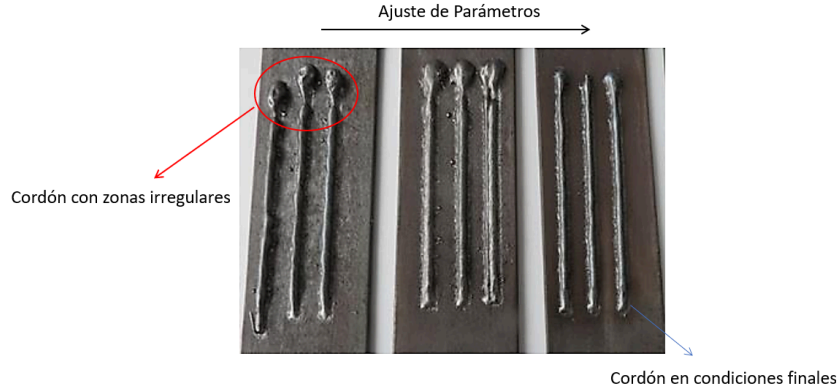


Figura 3.6) Mejora de la calidad del cordón de soldadura mediante el ajuste de parámetros. Nótese que las irregularidades corresponden al inicio de la formación del arco, lo que implica que el arco demoraba en estabilizarse. En las condiciones finales el arco era continuo y estable todo su trayecto.

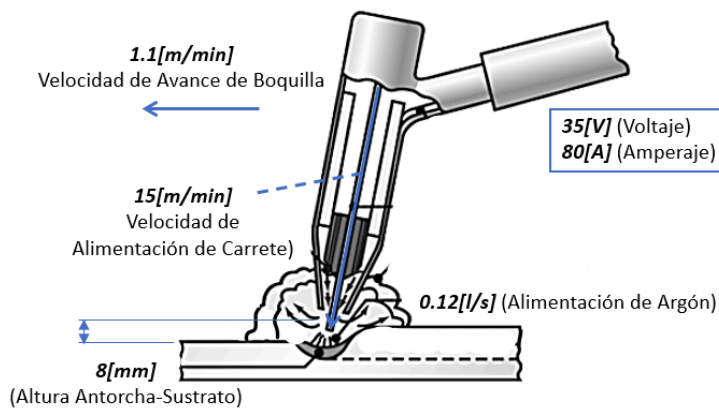


Figura 3.7 Parámetros finales del proceso. La regulación de la velocidad de alimentación del carrete se controla directamente en la máquina de soldar (así como el voltaje y amperaje), el avance de la boquilla corresponde a la velocidad de nuestra máquina CNC y el flujo de gas es controlado directamente de una válvula en la toma del tanque. La altura de 8[mm] entre la antorcha y el sustrato fue la misma entre capa y capa de material depositado. Tomado y modificado de [6].

Una vez que el cordón de soldadura tenía una buena calidad se procedió a manufacturar las piezas, para la probeta de ensayo de tensión se manufacturó la silueta descrita previamente, y para generar la probeta de impacto bastó únicamente con la impresión de un rectángulo de material que excediera levemente las distancias marcadas por la norma. Las probetas de tensión se realizaron con 4 pasadas de material, cada capa separada a la misma distancia de 8 mm (ver figura 3.8) y dejando pasar 40[s] entre capa para que se generará una breve convección natural que bajara la temperatura, dando como resultado probetas con una altura nominal de 32[mm] sin embargo este valor está acompañado de variaciones muy grandes en toda su superficie, se estimó un promedio de ± 0.5 [mm] en donde el límite inferior se encuentra en las orillas y el límite superior de medida al centro. El hecho de tener una mayor concentración de material al centro de la pieza puede ser causa del flujo del material en estado líquido descrito en la sección 2.5.4.

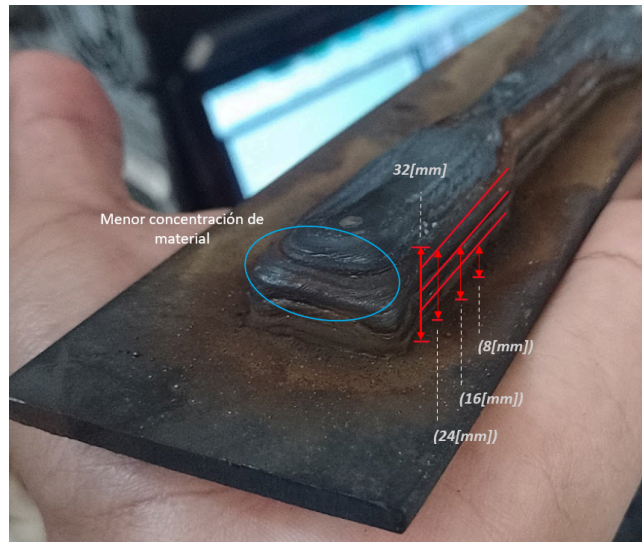


Figura 3.8 Probeta de tensión al término del proceso de impresión. Se puede reconocer a simple vista cada una de las capas de material con su separación, además se puede observar una mayor concentración de material en el centro de la probeta, pues en los bordes superiores de las esquinas no existe la misma distribución de masa (señalado en azul).

Una vez terminado el proceso de impresión 3D se procedió a realizar el proceso de maquinado de las probetas. El proceso inició con un proceso de careado de las probetas (que aún seguían pegadas al sustrato), posteriormente se cortó la pieza del sustrato por medio de una sierra manual (ver figura 3.10). Al cortar cada una de las piezas de su sustrato se procedió a volver a maquinar para darle a cada probeta las medidas estándar ASTM E8-04 para una probeta de tensión rectangular (espécimen 1, ½" tipo lámina, de acuerdo con la norma, ver figura 3.10) y una probeta de impacto de Charpy de acuerdo con la norma ASTM E23-01 (espécimen tipo A, ver figura 3.11). La figura 3.12 muestra el resultado final de nuestras probetas.

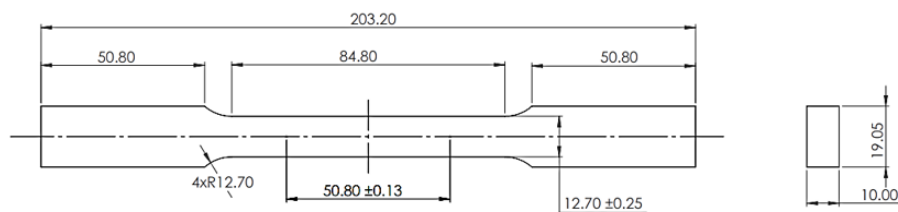


Figura 3.10 Medidas finales de probeta de tensión, las unidades mostradas son el equivalente en milímetros [7].

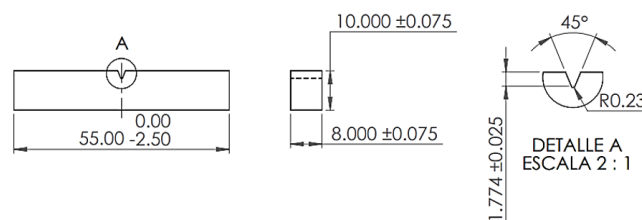
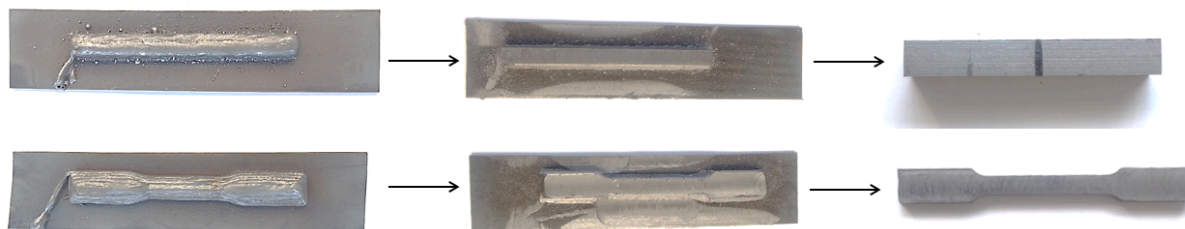


Figura 3.11 Medidas final es de probeta de impacto de Charpy, las unidades mostradas son el equivalente en milímetros [8].



3.12 Proceso de manufactura de piezas, partiendo de impresión, procesos de careado de superficies, corte con sustrato y maquinado a dimensiones finales.

En total se manufacturaron 10 probetas de tensión y 10 de impacto, de las cuales pasaron a ensayo solo las que presentaron menor cantidad de porosidades en su superficie una vez maquinadas, obteniendo así un total de 6 probetas de tensión y 7 de impacto. La tabla 3.1 muestra un promedio de los tiempos de manufactura de cada pieza, en total para las probetas de tensión se invirtió 25 horas y para las de impacto un aproximado de 16 hrs, dando un total aproximado de trabajo de 61 horas (dos días y medio)

Para el maquinado de las piezas se utilizó una fresadora vertical convencional Titanium (ver figura 3.13) y para realizar el corte en “V” de la probeta de impacto se utilizó una fresadora horizontal, además no se realizó ningún tipo de operación de rectificado de superficies. Todo el equipo y herramientas fueron proporcionados por los laboratorios de manufactura de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

<i>Probeta</i>	<i>Ajustes de Impresión por pieza [min]</i>	<i>Impresión por pieza [min]</i>	<i>Ajustes de Maquinado por pieza [min]</i>	<i>Maquinado por pieza[min]</i>	<i>Tiempo total por probeta [min]</i>
Tensión	20	11.5	30	90	150 (2.5hrs)
Impacto	20	5	30	40	95(1.58 hrs)

Tabla 3.1. Tiempos aproximados de los procesos de manufactura, los ajustes de impresión y de maquinado se refiere a ajustar material nuevo, ceros de trabajo, cambio de herramienta, ajuste de parámetros, etc.



Figura 3.13 Fresadora vertical Titanium utilizada para todos los procesos de maquinado.

Fuentes

- [1] American Welding Society AWS. *A5.18/A5.18:2021, Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding*, 2021.
- [2] Grupo INFRA. Aporte Para Soldadura. Tomado de :
<https://grupoinfra.com/librerias/descargas/1528394720476631349.pdf>
- [3] S. Kou, *Welding Metallurgy*. John Wiley & Sons, 2003.
- [4] Grupo INFRA. Ficha Técnica: Infra Welding Wire 70S-6. Tomado de:
<https://grupoinfra.com/files/libreria-de-descargas/ft-infra-welding-wire-70s-6.pdf>
- [5] Grupo INFRA. Ficha Técnica Trilogia 200i. Tomado de:
https://grupoinfra.com/img/productos/fichas/TRILOGIA_200i_FT.pdf
- [6] S. Kalpakjian, *Manufacturing Engineering And Technology*. S.L.: Pearson Education Limited, 2013.
- [7] ASTM E8/E8M-04, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, 2004.
- [8] ASTM E23-01, Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, ASTM International, 2001.

Capítulo 4:

Realización de Pruebas Mecánicas

4.1) Ensayo de Tensión

El ensayo de tensión es una prueba universal para determinar la curva esfuerzo-deformación de un metal, el cual es maquinado a dimensiones estándar dadas por normas y sujetado en una máquina universal de ensayos de tensión, la cual se encarga de aplicar una fuerza de tensión uniaxial que va incrementando continuamente. La probeta de tensión cuenta de un par de marcas iniciales, las cuales sirven para poder tener una referencia en las mediciones de la deformación (ver figura 4.1)

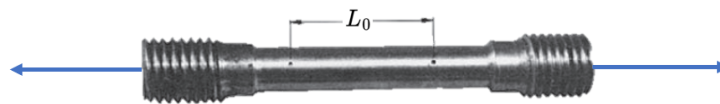


Figura 4.1) Probeta estándar de tensión señalando la distancia inicial de medición para la longitud de la probeta [1]

Una vez que la máquina comience a aplicar fuerza y a deformar axialmente la probeta, se harán mediciones consecutivas para comparar dichos valores con el valor original, definiendo la elongación como:

$$\delta = L - L_0 \quad (4.1)$$

La probeta de tensión tiene un área de sección transversal inicial, conforme la máquina vaya deformando uniformemente la probeta en dirección axial se tendrá como resultado un cambio de sección transversal (irá disminuyendo). El esfuerzo en cada punto del ensayo, debido a la carga P aplicada por la máquina en función de dicha área de sección transversal inicial A_0 se conoce como esfuerzo ingenieril s , y se define por la ecuación 4.2 (en el caso del esfuerzo verdadero, en vez de considerar A_0 se considera el área de sección transversal correspondiente a cada punto de medición A).

$$s = \frac{P}{A_0} \quad (4.2)$$

Asociado a este esfuerzo se encuentra la deformación ingenieril e que considera la longitud inicial de la probeta (ecuación 4.3)

$$e = \frac{\delta}{L_0} \quad (4.3)$$

Debido a que a lo largo del ensayo se provocan deformaciones que van modificando los valores de sección transversal y longitud, para obtener valores más precisos se definen las mismas cantidades considerando los cambios dimensionales señalados, es decir, se obtiene la deformación verdadera (ecuación 4.4) y el esfuerzo verdadero (ecuación 4.5)

$$\epsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln(1 + e) \quad (4.4)$$

$$\sigma = \frac{P}{A} = s(e + 1) \quad (4.5)$$

La curva general de un ensayo de esfuerzo deformación para un metal se muestra en la figura 4.2 en donde se puede observar puntos clave que nos dan información valiosa del material que sirve para cuestiones de diseño mecánico y manufactura. En la zona O-A de la figura 4.2 se tiene una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación, dicha zona es conocida como zona de deformación elástica, en donde si se retira la carga, la probeta regresará a sus dimensiones originales, la relación lineal estopa dada por la Ley de Hooke $\sigma = E\epsilon$ donde E se conoce como el módulo de elasticidad y corresponde a la pendiente de dicha zona[1],[2].

El punto A indica donde la proporcionalidad deja de tener efecto, pues la zona del punto B-C corresponde a la fluencia del material, es decir, el límite en el cual se deja de tener deformación elástica y se comienza a tener deformación plástica (permanente). La zona de deformación plástica abarca del punto B al E, de C-D el material comienza a endurecerse debido a que el número de dislocaciones del material comienzan a crecer y se comienzan a apilar, dando como resultado un endurecimiento del material [2]. En el Punto D se forma un fenómeno conocido como Necking(también conocido como cuello de botella), en el cual los esfuerzos se concentran en la zona central de la probeta dando como resultado un cuello de botella (ver figura 4.3). Por último, en el punto E se tiene la fractura de la probeta. La línea punteada que abarca de C a E' corresponde a la trayectoria obtenida de las mediciones del esfuerzo y deformaciones reales, como se puede observar, en toda la región de deformación elástica los valores ingenieriles no varían significativamente de los reales, por eso es que los valores ingenieriles juegan un papel de aproximación rápido y válido, ya que se requieren de menos datos para poder obtener resultados confiables en una zona de deformación utilizada ampliamente en el diseño mecánico [1], [2], [3].

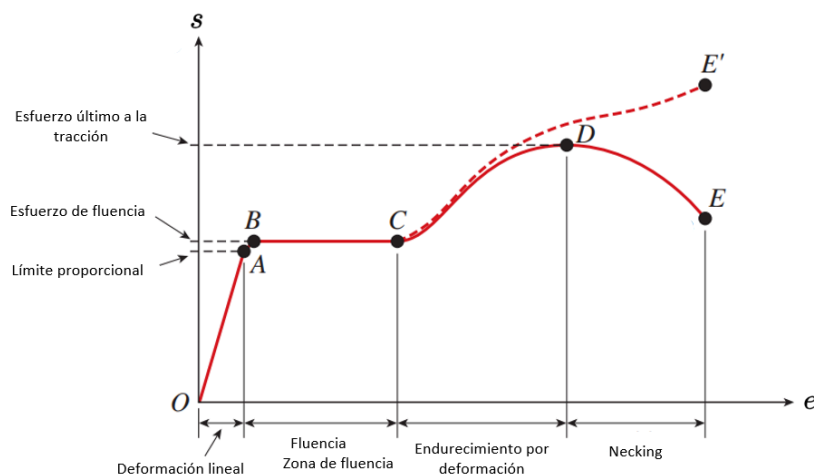


Figura 4.2 Curva esfuerzo - deformación general de un metal [3].

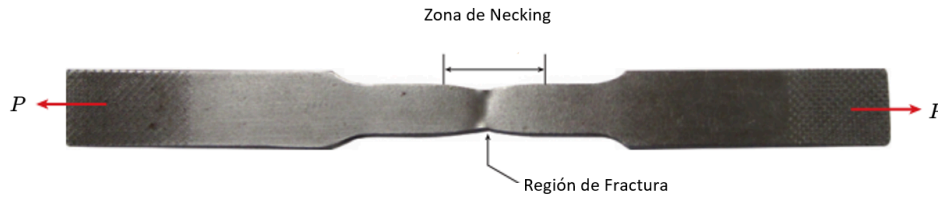


Figura 4.3 Zona de necking en una probeta de tensión, debido a la reducción de área en dicha zona, se genera un concentrador de esfuerzos que genera la fractura en esa zona [3].

La región de deformación plástica (zona C-E' de la figura 4.2) puede ser modelada en una escala logarítmica considerando la deformación y esfuerzos reales, tal como se muestra en la figura 4.4, dicha curva se conoce como *curva de fluencia*.

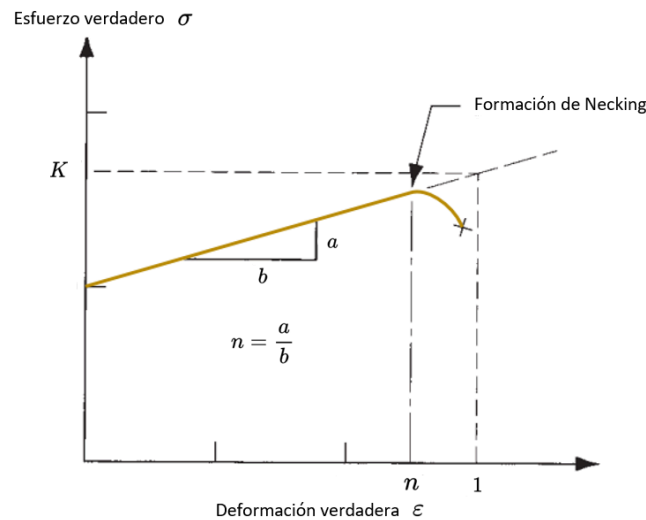


Figura 4.4 Curva de fluencia de un metal obtenida por la traficación logarítmica de los valores de esfuerzo y deformación verdaderos. Modificado y traducido de [4].

Debido a que ahora contamos con una línea recta en la zona de deformación plástica, se puede llegar a la siguiente relación:

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (4.6)$$

La constante K se conoce como el *coeficiente de resistencia* y corresponde al valor del esfuerzo verdadero cuando la deformación verdadera toma el valor de 1. La constante n se conoce como *coeficiente de endurecimiento por deformación* y corresponde a la pendiente de la recta resultante de la escala logarítmica, medidas empíricas señalan que cuando la deformación verdadera alcanza el valor de dicho coeficiente es cuando se comienza a formar la zona de necking. Conocer los valores que definen nuestra curva de fluencia es útil en procesos de manufactura, donde superar el punto de fluencia es el primer requisito para poder dar la forma deseada a un metal [4].

4.2) Realización de Ensayo de Tensión

La realización de la prueba de tensión se llevó a cabo en los laboratorios de Ingeniería de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, donde se colocó una etiqueta numerada a cada probeta para poder hacer un análisis posterior de acuerdo con los resultados obtenidos. Para realizar la prueba se ajustaron los parámetros estándar del ensayo, además de colocar el valor del área de sección transversal de cada probeta (valor que puede ser encontrado en las medidas de la figura 3.0) pues el software de la máquina utiliza estos valores para calcular en automático el esfuerzo y deformación real a partir de las mediciones de carga y desplazamientos obtenidos. Todo el experimento se realizó a temperatura ambiente.

Cada probeta se ajustó a las mordazas de la máquina, las cuales por medio de una serie de muescas generan el agarre necesario para sujetar y deformar de manera uniforme la probeta, dando como resultado las curvas de la figura 4.4.

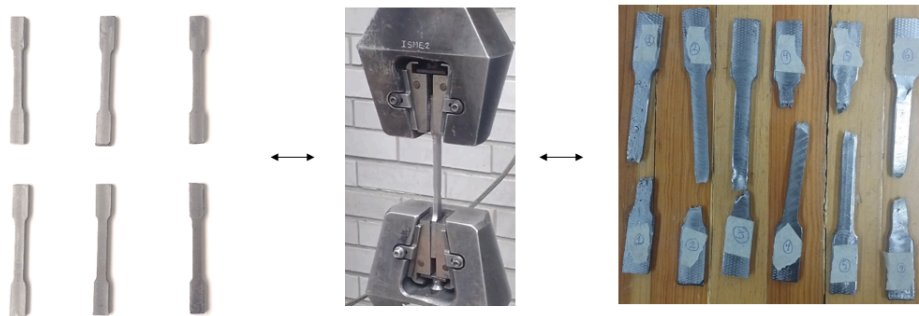


Figura 4.5 Probetas antes, durante y después del ensayo de tensión, del lado derecho se enumeran de izquierda a derecha las probetas de la 1 a la 5 respectivamente.

4.3) Ensayo de Impacto de Charpy

El ensayo de impacto nos sirve para caracterizar la energía necesaria para obtener fractura en una muestra estándar (medidas de la probeta estándar en figura 3.11). La energía viene directamente de un péndulo, donde por medio de una diferencia de alturas es posible calcular la cantidad de energía absorbida por la muestra antes de fracturar. El equipo estándar para la realización de un ensayo de impacto se muestra en la figura 4.6, consta de un péndulo al cual se le pueden acoplar masas, una manivela de ajuste para subir el péndulo, un indicador para tomar lecturas y una zona donde la muestra será colocada para recibir el impacto.

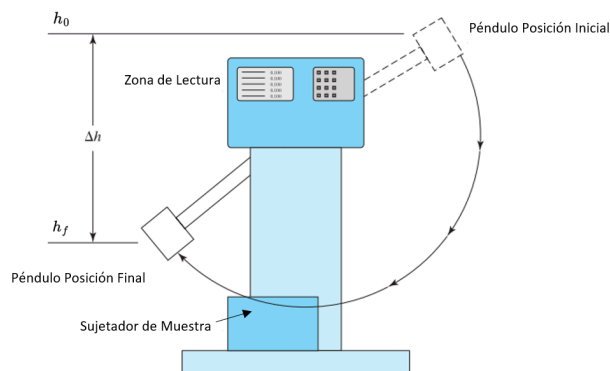


Figura 4.6 Componentes de una máquina de ensayo de impacto. El péndulo en ausencia de una muestra a la cual impactar tendrá una Δh establecida. Al impactar con una muestra partiendo de las mismas condiciones se llegará a una altura h_f diferente, esa diferencia en energía es precisamente la que la muestra absorbió para fracturar, generalmente es medida en Joules. Tomada y traducida de [5].

Existe otra prueba de impacto similar conocida como *ensayo de impacto de Izod* (la cual cuenta con sus dimensiones estándar de acuerdo con norma), la forma en que difieren estas dos pruebas es mediante la forma en que la probeta es colocada para recibir el impacto (figura 4.7). La prueba de impacto de Charpy es un estándar en Estados Unidos, mientras que Izod es más común en Europa [2].

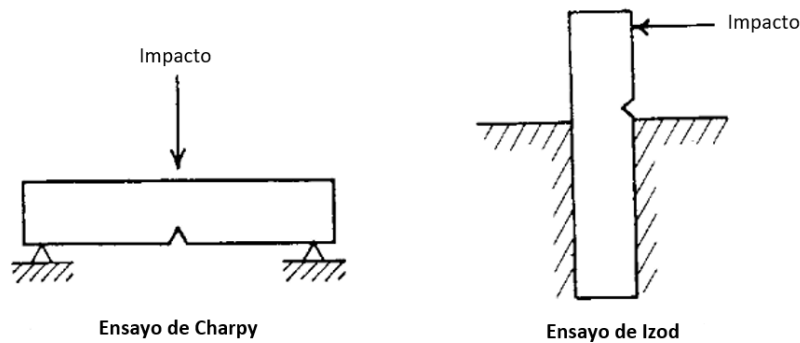


Figura 4.7 Ensayo de Impacto de Charpy vs Izod, la diferencia en cómo las muestras reciben el impacto, además de la diferencia de dimensiones definen ambas pruebas. Tomado y traducido de [2].

Cuando el péndulo de la máquina impacta la muestra, todos los mecanismos descritos en la sección 4.1 de un ensayo de tensión se desarrollan de una forma muy rápida, dando como resultado una correlación directa entre los valores de impacto obtenidos en el ensayo con el área debajo de la curva de esfuerzo deformación (figura 4.2) [5].

4.4) Realización de Ensayo de Impacto de Charpy

Para realizar los ensayos, las 7 muestras seleccionadas que cumplieran con la menor cantidad de porosidades fueron colocadas en el equipo de ensayo de impacto del mismo laboratorio donde se realizaron los ensayos de tensión (figura 4.8).

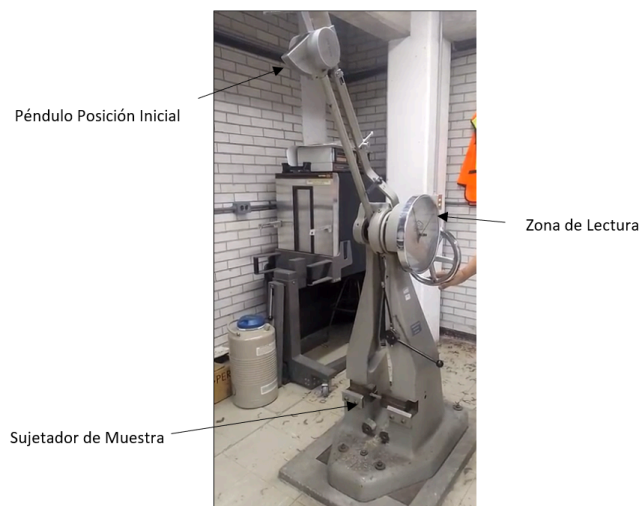


Figura 4.8 Equipo de Ensayo de Impacto

Cada una de las muestras fueron colocadas como se señala en la imagen 4.7 para el ensayo de Charpy, dando como resultado la fractura de todas las muestras, tal y como se muestra en la figura 4.9. Para realizar la prueba se utilizaron 300[J] de energía de carga para el péndulo en posición inicial.

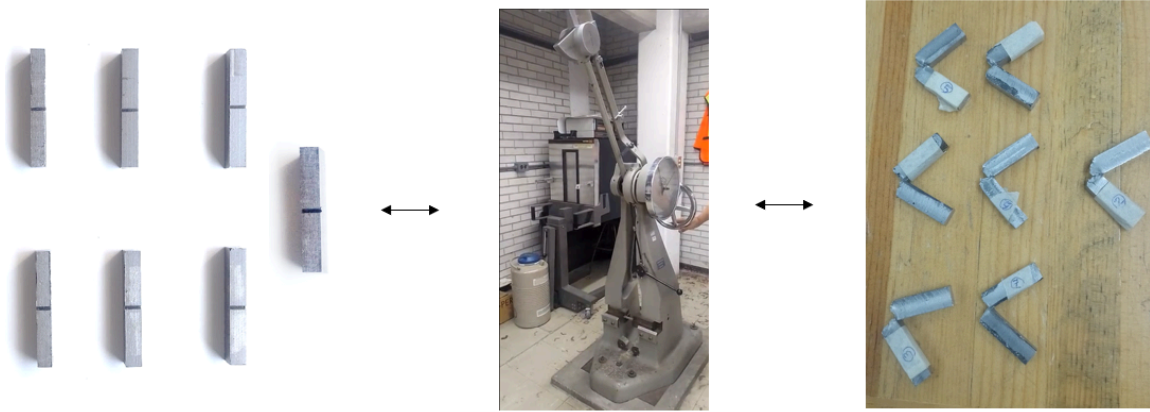


Figura 4.9 Probetas antes, durante y después del ensayo de impacto, todas presentaron fractura donde se maquinó el concentrador de esfuerzos, sin embargo, ninguna se separó en 2 partes.

Fuentes

- [1] R. C. Hibbeler, *Mechanics of materials*, 8th ed. Boston: Prentice Hall, 2011.
- [2] George Ellwood Dieter, *Mechanical Metallurgy*. 1988.
- [3] B. J. Goodno and J. M. Gere, *Mechanics of materials*. Boston, Ma: Cengage Learning, 2018.
- [4] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing*. John Wiley & Sons, 2015.
- [5] J. F. Shackelford, *Introduction to materials science for engineers*, 8th ed. Boston U.A.: Pearson, 2016.

Capítulo 5:

Resultados de Pruebas Mecánicas

5.1) Resultados de Ensayo de Tensión

La prueba de tensión se realizó en las 6 probetas maquinadas (figura 4.5) dando como resultado las curvas esfuerzo deformación de la figura 5.1.

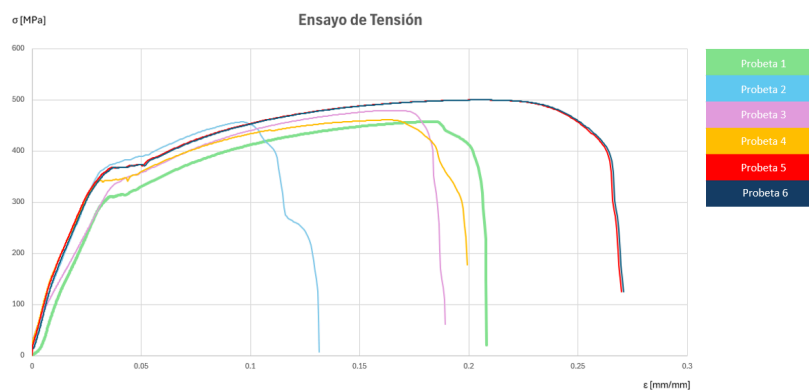


Figura 5.1 Resultados de la prueba de tensión de las 5 probetas maquinadas.

Es posible observar cómo las probetas 5 y 6 tienen valores similares, mientras que la probeta 2 presenta la formación del necking de manera más rápida que todas (lo cual puede ser un indicio que internamente se tenían porosidades que no era fácilmente visibles después de maquinarse, dando como resultado que en dicha porosidades se generarán concentradores de esfuerzos que facilitarían la formación del necking [1]), mientras que en la probeta 5 y 6 se tiene el caso contrario, donde el necking se forma más tarde y por consiguiente la probeta alcanza la mayor deformación antes de deformarse.

A pesar de tener este comportamiento en la región plástica, en la zona de deformación elástica las 6 probetas tienen un comportamiento similar (figura 5.2)

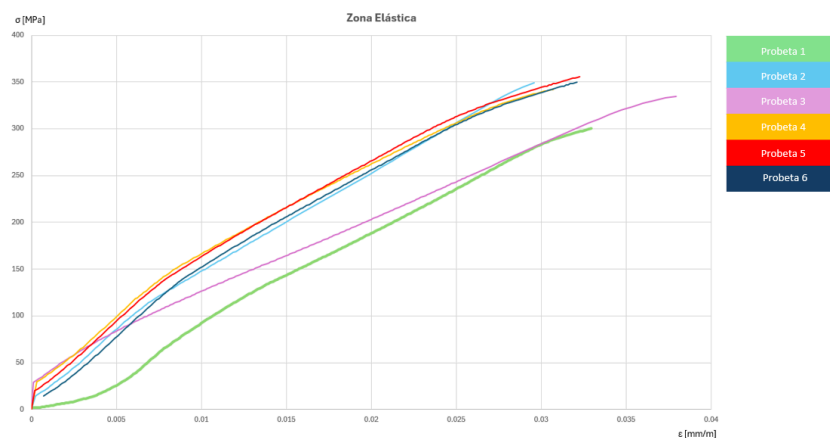


Figura 5.2 Resultados en la región elástica.

Con los resultados obtenidos es posible obtener los módulos de elasticidad con una regresión lineal para cada curva en la zona elástica, además de identificar los esfuerzos de fluencia, esfuerzos últimos a la tracción y esfuerzos de fractura de todas las curvas de la figura 5.1. Los resultados son mostrados en la tabla 5.1

Probeta	Módulo de Elasticidad [MPa]	Esfuerzo de Fluencia [MPa]	Esfuerzo Último a la Tracción [MPa]	Esfuerzo de Fractura [MPa]
1	9843.8	300.19	457.21	20.18
2	11561	349.31	456.59	6.86
3	8117.6	334.83	478.95	82.56
4	10264	341.99	460.53	177
5	10501	355.30	499.7	125.4
6	10749	349.89	499.7	124.4

Tabla 5.1 Valores característicos de la curva esfuerzo deformación de las 5 probetas de tensión de acero ER-70S-6.

Promediando los resultados obtenemos los valores de la tabla 5.2.

Módulo de Elasticidad [MPa]	Esfuerzo de Fluencia [MPa]	Esfuerzo Último a la Tracción [MPa]	Esfuerzo de Fractura [MPa]
10172.73	338.58	475.44	89.4

Tabla 5.1 Valores característicos de ensayo de tensión de acero ER-70S-6.

La figura 5.3 muestra una imagen más detallada de una probeta de tensión donde es posible apreciar algunas porosidades en la superficie (del total de piezas manufacturadas, las 6 probetas seleccionadas son las que contaron con menor cantidad de porosidades), mientras que la figura 5.4 muestra una imagen más de cerca de las probetas fracturadas.

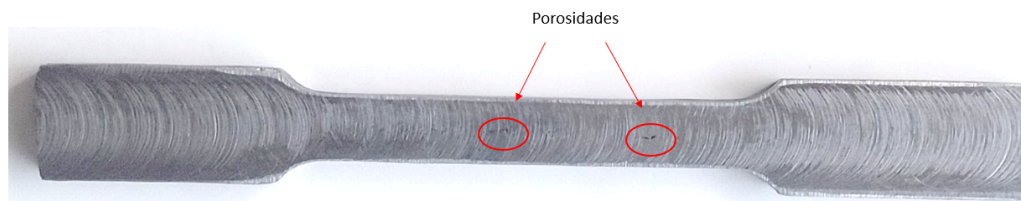


Figura 5.3 Porosidades en muestras de tensión.



Figura 5.3 Probetas de tensión después del ensayo.

5.2) Resultados de Ensayo de Impacto

Los resultados del ensayo de impacto de las 7 probetas maquinadas se muestran en la tabla 5.3

Probeta	Energía Absorbida [J]
1	46
2	144
3	54
4	73
5	168
6	144
7	110

En promedio se tiene un valor de 105.57[J] de las 7 muestras. Al igual que las probetas del ensayo de tensión, las probetas de impacto presentaron porosidades (en menor medida), la figura 5.4 muestra más a detalle una de estas muestras. A pesar de contar con porosidades superficiales, todas las probetas fracturaron de la misma manera, con una propagación partiendo de la muesca central maquinada, ya que precisamente es el objetivo, otorgar un concentrador de esfuerzos controlado [2], la figura 5.5 muestra las probetas después de realizar en ensayo.

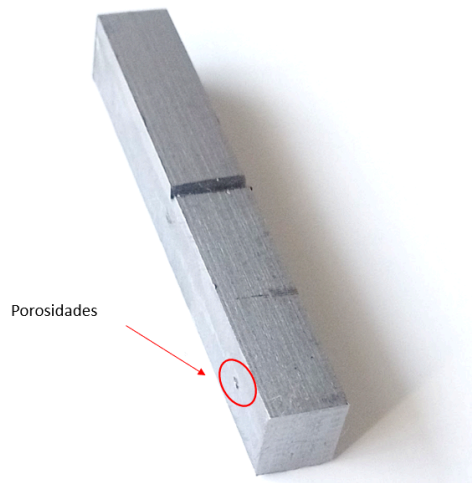


Figura 5.4 Porosidades en muestras de impacto.



Figura 5.3 Probetas de impacto después del ensayo

Fuentes

- [1] R. C. Hibbeler, *Mechanics of materials*, 8th ed. Boston: Prentice Hall, 2011.
- [2] J. F. Shackelford, *Introduction to materials science for engineers*, 8th ed. Boston U.A.: Pearson, 2016.

Capítulo 6:

Conclusiones y Comentarios

Una vez finalizado el proceso de manufactura de piezas mediante WAAM se pueden obtener conclusiones muy interesantes del proceso, a pesar de haber trabajado con piezas relativamente sencillas de producir (desde un contexto industrial) se pueden apreciar múltiples debilidades y ventajas si se aplicara este tipo de manufactura en las líneas de producción modernas.

6.1) Reducción en Desperdicios de Materia Prima

El proceso nos brindó probetas muy cercanas a la forma final (figura 6.1), durante el proceso de maquinado de las piezas, el desperdicio de material removido (rebabas metálicas) fue mucho menor si se hubiera realizado el proceso mediante un maquinado convencional, partiendo de un tocho de material sólido. Considerando dicho escenario, donde se hubiera optado por fabricar probetas de tensión partiendo de una solera de acero 1018 comercial para ser maquinadas, se hubiera optado por la que mejor se ajustara a las dimensiones, en este caso una de 12.7x25.4mm x 3.05m sería la adecuada[1]. Sin embargo, considerando el volumen de una probeta de tensión (32.59 cm^3) y el volumen de la solera, teóricamente se podrían obtener 29 probetas. El problema cae cuando se deben fabricar cantidades pequeñas de piezas, por ejemplo, en el caso de nuestras 10 probetas, se hubiera aprovechado únicamente el 3.36% de la materia prima, en cambio, con la manufactura aditiva se deposita únicamente la cantidad que se requiera procesar, dando un ahorro significativo cuando se trata de manufacturar componentes a corta escala cuando la materia prima disponible se encuentra en presentaciones muy sobradas para lo requerido.

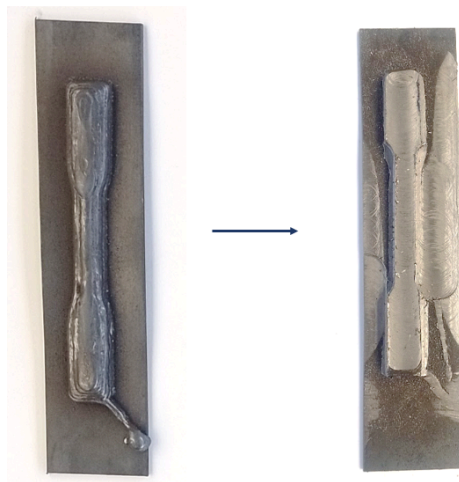


Figura 6.1) Probeta antes y después del maquinado. Se estima que (sin considerar el sustrato que será removido posteriormente por corte) se removieron únicamente de 3 a 5 mm en cada superficie maquinada.

De acuerdo con [2] se estima que globalmente, de todos los desperdicios generados en los procesos de manufactura, aquel generado por estas condiciones de material removido (rebabas) equivale a un 13.7% para aluminio, 14.6% para aceros y en casos más críticos como en el titanio (el cual requiere de múltiples procesos de maquinado debido a la complejidad de las geometrías para las que es empleado) el 55% equivale a estos desperdicios.

6.2) Defectos Persistentes

A pesar de obtener una mejora considerable en la calidad visual de las muestras conforme los parámetros de soldadura se iba ajustando (ver figura 6.2) las probetas presentaban numerosos poros y grietas superficiales e internas, muchas de ellas fueron perceptibles hasta terminar de maquinar las probetas (ver figura 6.3).

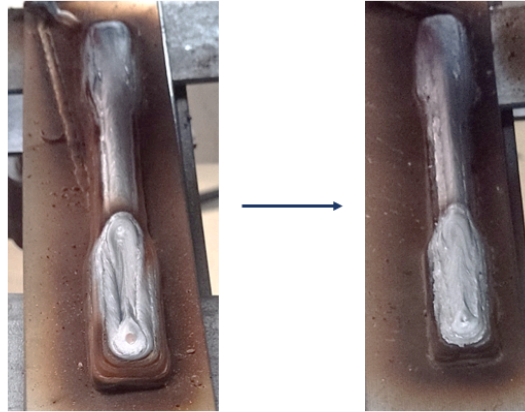


Figura 6.2 Mejora en la uniformidad de la pieza conforme los parámetros fueron ajustándose. A la izquierda se pueden observar hendiduras de material, no se obtenía un depósito uniforme que pudiera llenar la totalidad del volumen requerido.

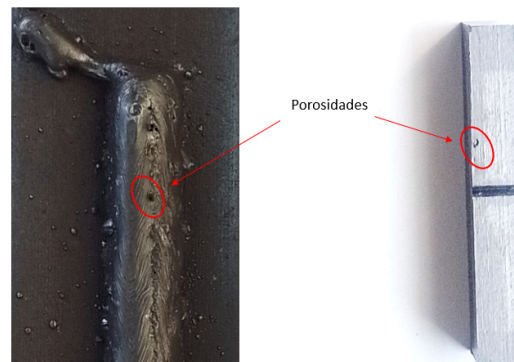


Figura 6.3 Poros visibles antes y después de maquinar probetas de impacto.

Los defectos restan resistencia mecánica al generar concentradores de esfuerzos en condiciones de aplicación estáticas, y presentan una situación más crítica si se trataran de utilizar en componentes de maquinaria sujetos a cargas cíclicas, pues, los poros reducen notablemente la resistencia a la fatiga del material, además, los esfuerzos residuales producto de la soldadura también pueden generar problemas. La mayoría de éstos defectos se presentaban en los bordes del material, una causa de esto puede ser la forma en que el material fundido fluye al ser depositado, especialmente en las orillas (sección 2.5.4), pues el flujo del material no es controlado y tiende a concentrarse en centro del depósito y no de forma uniforme (ver figura 6.4), por ello, el flujo al no permanecer estático y tener una menor concentración en las orillas pudo haber brindado las condiciones necesarias para la formación de poros.

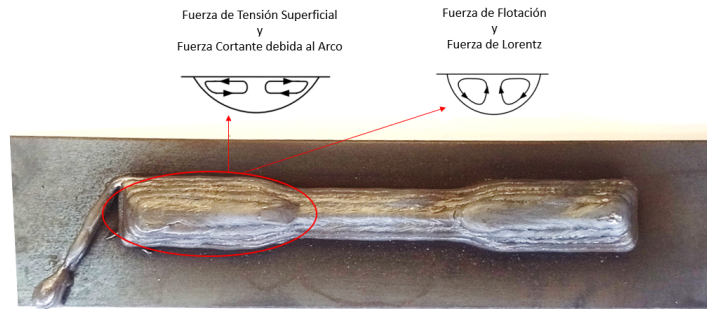


Figura 6.3 Flujo del material debido a las distintas fuerzas que actúan sobre el material fundido cuando es depositado y comienza a solidificar (explicación en sección 2.5.4) [3]

Debido a que no se puede tener un control preciso en la forma que las probetas solidifican por la naturaleza caótica del arco eléctrico, cada pieza tendrá una forma diferente de solidificar y por consecuencia propiedades diferentes, no se tendrá isotropía, ni repetibilidad fiable en la calidad de los productos, por ello no es un proceso óptimo para realizarse en componentes a gran escala, debido a que sería muy complicado obtener una repetibilidad en la calidad de las piezas.

6.3) Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas del material depositado presentaron una mejoría comparadas con las propiedades del material inicial (microalambre original), pero comparadas con otros datos reportados en diversas investigaciones para la misma aleación se tienen una reducción considerable del módulo de elasticidad, mientras que las demás propiedades se mantienen en rangos similares, la tabla 6.1 muestra una comparativa de los rangos de valores mencionados.

<i>Material</i>	<i>Fuente</i>	<i>Esfuerzo de Fluencia [MPa]</i>	<i>Esfuerzo Último a la Tracción [MPa]</i>	<i>Energía de Fractura [J]</i>
ER70S-6 (Depositado)	Obtenidos en experimentación	(300.19 - 355.3)	475.44	(46 - 168)
ER70S-6 (Microalambre Sólido)	[4],[5],[6]	400	480	27
ER70S-6 (Depositado)	[7]	(317 - 350)	(450 - 469)	(27 - 112)
ER70S-6 (Depositado)	[8]	(319 - 405)	(434 - 503)	Prueba no realizada
ER70S-6 (Depositado)	[9]	(300 - 651)	(415 - 715)	Prueba no realizada

Tabla 6.1 Rangos de valores para acero ER70S-S en diferentes fuentes, no todos los resultados citados fueron obtenidos mediante los mismos parámetros (voltajes, corrientes, direcciones de depósito, etc) sin embargo, oscilan por valores similares.

Al ver la tabla 6.1, la comparación de los valores de las propiedades mecánicas obtenidas en experimentación con aquellas experimentaciones realizadas con otros autores y los valores de fabricantes

del microalambre sólido se puede notar que todas oscilan por rangos de valores muy similares, lo cual nos deja ver que se obtienen resultados válidos. Los resultados obtenidos de éste trabajo brindan una base de datos técnicos para futuros trabajos que necesiten tener datos específicos del comportamiento mecánico de la aleación dados los parámetros utilizados en experimentación, además, con ésta misma metodología se ha publicado un artículo científico [5] en la Sociedad Mexicana de Ingenieros Mecánicos (SOMIM), el cual fue publicado y presentado en las Memorias del XXX Congreso Internacional Anual de la SOMIM, celebrado del 25 al 27 de septiembre del 2024 en la ciudad de Querétaro, México, obteniendo un buen recibimiento por parte de la comunidad de investigación científica en el área de ingeniería mecánica en México.

Las variaciones que existen en los rangos de valores de las propiedades pueden ser causa de los múltiples poros encontrados en las piezas, los cuales generan múltiples concentradores de esfuerzos, además de los esfuerzos residuales (fenómeno descrito en sección 2.5.3). La reducción de los poros se podría controlar directamente con la mejora de los parámetros del proceso de soldadura, el avance y velocidad de depósito del material. Al depositar una mayor cantidad de material con un avance más lento se podría obtener una mejor calidad en los productos, por lo que los resultados obtenidos para esta experimentación pueden ser optimizados, además, los esfuerzos residuales pueden ser eliminados si se aplicara un tratamiento térmico posterior al depósito de la pieza.

6.4) Posibles Áreas de Aplicación

Los resultados de la experimentación nos dejan ver que es posible obtener una mejora en las propiedades mecánicas del acero ER70S-6 cuando este se deposita por medio de un proceso de manufactura aditiva por arco eléctrico, comparado con las propiedades originales del material. A pesar de tener defectos comparado con otros aceros, el proceso mostrado en esta tesis puede ser una herramienta útil para:

6.4.1) Reparaciones Mecánicas de Urgencia

Como se mostró en la figura 1.20, el proceso brinda una gran facilidad poder agregar capas de material (en cualquier acero al carbono que pueda ser soldable con ER70S-6), sin importar la complejidad del componente, ya que se puede programar mediante el router CNC. y la posterior remoción del material para llegar a las dimensiones y acabados finales se puede lograr con un proceso de maquinado convencional. En la actualidad la gran mayoría de talleres de mantenimiento en la industria cuentan con máquinas de soldadura MIG, fresadoras y tornos convencionales, por lo que el proceso puede ser una gran opción en el caso de mantenimientos correctivos de urgencia, ya que las reparaciones se pueden terminar en cuestión de horas, mientras que muchas veces pedir una refacción nueva o solicitar a un proveedor externo que realice la reparación puede tardar meses, lo cual en la industria simboliza una pérdida enorme de dinero si una máquina o herramental de producción presenta falla. Esta opción solo representa una solución temporal si se trata de un componente sometido a cargas cíclicas, ya que los defectos y esfuerzos residuales reducirán la resistencia a la fatiga del componente [10], sin embargo, si se trata de componentes estáticos (algunos herramentales o componentes del bastidor de una máquina) si podría representar una solución completa.

6.4.2) Prototipado Rápido

Al igual que en el caso de las reparaciones mecánicas, la facilidad de adaptar el proceso en actividades industriales representa no solamente un ahorro en tiempo sino también en dinero. En industrias donde se

desarrollan productos nuevos, WAAM puede desempeñar un papel clave para poder acelerar el proceso de diseño a un costo y tiempo considerablemente menor que si se optara por otros métodos. En cuanto al desarrollo de nuevos productos, las propiedades mecánicas alcanzadas pueden ayudar a dar una idea del desempeño en un prototipo fácil de fabricar, dando una ventaja competitiva a los diseñadores de obtener una retroalimentación mucho más rápida y optimizar el proceso de diseño. Además, en la industria el empleo de éste proceso puede ser adaptado en la fabricación de herramientas para producción (ya sean prototipos o muestras completamente funcionales) como moldes de inyección, gauges, cuchillas, guías, o cualquier otro componente que no esté sometido a cargas elevadas o ciclos de trabajo muy demandantes, ya que dichos componentes no son fabricados en masa, por lo tanto, la adaptación y optimización de un proceso como el presentado puede representar un ahorro significativo de tiempo y dinero en la industria.

Fuentes

- [1] *Aceros y Metales Cuautitlán*. Solera de Acero en aleación 1018 en múltiples medidas” <https://acerosymetalescuautitlan.com.mx/venta/solera-de-acero-1018/>
- [2] S. Dhiman *et al.*, “A framework for effective and clean conversion of machining waste into metal powder feedstock for additive manufacturing,” *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 4, p. 100151, Oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100151>
- [3] S. Kou, *Welding Metallurgy*. John Wiley & Sons, 2003.
- [4] Grupo INFRA. Ficha Técnica: Infra Welding Wire 70S-6. Tomado de: <https://grupoinfra.com/files/libreria-de-descargas/ft-infra-welding-wire-70s-6.pdf>
- [5] J. Cervantes, *et al.*, “Soldadura automatizada, una alternativa para la manufactura aditiva con acero ER70S-6, propiedades y características de las piezas obtenidas.” doi: https://somim.org.mx/memorias/memorias2024/articulos/MM/A2_2.pdf
- [6] CODESOL . Ficha técnica ER 70S-6. Tomado de: https://www.bonnet.es/catalogo/ficha_tecnica/varilla%20solda%20hierro%20ER%2070S-6.pdf
- [7] Vittoria Laghi *et al.*, “Mechanical and microstructural features of wire-and-arc additively manufactured carbon steel thick plates,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 127, no. 3–4, pp. 1391–1405, May 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11538-3>
- [8] X. Guo, P. Kyvelou, J. Ye, L. H. Teh, and L. Gardner, “Experimental investigation of wire arc additively manufactured steel single-lap shear bolted connections,” *Thin-Walled Structures*, vol. 181, p. 110029, Dec. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110029>
- [9] C. Huang, P. Kyvelou, R. Zhang, T. Ben Britton, and L. Gardner, “Mechanical testing and microstructural analysis of wire arc additively manufactured steels,” *Materials & Design*, vol. 216, p. 110544, Apr. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110544>
- [10] R. L. Norton, *Machine design : an integrated approach*. Boston: Prentice Hall, 2020.