Simulación Computacional de la Transferencia de Calor en un Acero AISI-SAE 1020 Mediante los Mecanismos Globular y Spray en Procesos de Soldadura GMAW

Jhon Alex Sarmiento Quiroz y Cesar Andrés Tovar Bermúdez

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Metalúrgico

Director
Mauricio Rincón Ortiz
Doctor en Ciencia y Tecnología Mención Materiales

Codirector
Jeferson Owaldo Ruiz Lizarazo
Magíster en Ingeniería de Materiales

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas
Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales
Bucaramanga
2021

Tabla de Contenido

Pág.

Introducción 10

1. Objetivos 11

1.1 Objetivo General 11

1.2 Objetivos Específicos 11

2. Marco Teórico 12

2.1 Antecedentes 12

2.2. Fundamentos teóricos de la soldadura GMAW 14

2.2.1. Mecanismo de transferencia globular 14

2.2.2. Mecanismo de transferencia spray 15

2.2.3 Transferencia de calor en la soldadura 15

2.2.4. COMSOL Multiphysics ® 5.6. 18

3. Metodología experimental 19

3.1 Construcción de la geometría de la soldadura en el simulador. 19

3.2. Condiciones y consideraciones del modelo 20

4. Resultados y discusión 23

4.1. Estudio 1. Estado estacionario: Flujo de fluidos 23

4.2. Estudio 2. Estado transitorio: Distribución de corriente y temperatura 24

4.3. Efecto de la corriente en la transferencia de calor 29

5. Conclusiones 33

Referencias Bibliográficas 34

Apéndices 38

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1. *Propiedades del electrodo AWS A5-18 ER70S6 suministradas en COMSOL.* 21

Tabla 2. *Propiedades del gas argón suministradas en COMSOL.* 21

Tabla 3. *Comparación de las condiciones de operación que el potencial eléctrico.*.....27

Tabla 4. *Artículos comparados para la validación del modelo.* 30

Lista de Figuras

Pág.

Figura 1: *Geometría del sistema de soldadura.* 19

Figura 2. Mallado establecido en el software COMSOL Multyphisic®.....222

Figura 3. Distribución del flujo de gas de protección, Argón. 233

Figura 4. Distribución de temperatura a corriente de 200A. (a) pasado 0.5 segundos; (b) pasado 1 segundo.....244

Figura 5. Distribución de temperatura a corriente de 230A. (a) pasado 0.1segundos; (b) pasado 1 segundo.....255

Figura 6. Potencial eléctrico (V) del sistema a) 200A. y b) 230A 266

Figura 7. Comparación de resultados para las temperaturas encontradas, entre los autores referenciados. 299

Lista de Apéndices

Pág.

Apéndice A. Composición química del alambre-electrodo 38

Apéndice B. Variación en volumen y tasa de transferencia de gotas 38

Apéndice C. Ecuación para porcentaje de error 39

Apéndice D. Velocidad de alimentación del electrodo 39

Lista de símbolos

Símbolo	Definición	Unidad
A	Área trasversal del caudal	m^2
Ae	Área transversal del electrodo	m^2
Rmayor	Radio de la boquilla	m
Rmenor	Radio del electrodo	m
Vgas	Velocidad del gas en el eje z	m/s
V	Voltaje	V
Fm	Flujo másico del electrodo	m^3/s
Den	Densidad del electrodo	kg/m^3
Flu	Flujo volumétrico del electrodo	m^3
Q	Caudal del gas	m^3/s
J	Densidad de corriente	A/ m^2
Q_e	Velocidad de transferencia de calor de la fuente de calor al electrodo	J/s
$Q_{j\cdot v}$	Densidad de corriente volumétrica	A/ m^2
E	Tensión del arco eléctrico	V
C_p	Calor especifico	J/(kg*K)
ρ	Densidad	Kg/m^3
T	Temperatura	K
k	Conductividad eléctrica	S/m
u	Vector de campo de velocidad	-
q_0	Calor generado por la convección	J/s
q	Calor generado por conducción	W/m^2
n	Vector de posición	-
Q	Es calor total generado	J
I	Corriente	A

Resumen

Título: Simulación computacional de la transferencia de calor en un acero AISI-SAE 1020 mediante los mecanismos globular y spray en procesos de soldadura GMAW*

Autores: Jhon Alex Sarmiento Quiroz, Cesar Andrés Tovar Bermúdez**

Palabras Clave: Arco eléctrico, Transferencia de calor, Modelo matemático.

Descripción: El proceso de soldadura con arco eléctrico que produce la fusión localizada de metales por medio de un electrodo consumible y la pieza de trabajo, con un gas de protección se denomina proceso GMAW. Dicho proceso permite utilizar cuatro mecanismos de transferencia del metal: corto circuito, globular, spray y spray pulsado. Para este proyecto se desarrolló un modelo bidimensional axisimétrico en el software COMSOL Multiphysics ® 5.6, que relaciona las principales variables operacionales para los modos de transferencia globular y spray en soldadura GMAW, manteniendo la corriente como la variable independiente del proceso. Finalmente, los resultados de distribución de temperatura y potencial eléctrico encontrados fueron comparados con estudios anteriores en corrientes iguales y/o similares, obteniendo resultados temperaturas en el arco 16000 y 21500K en mecanismos de transferencia globular y spray, respectivamente. Y valores de potencial eléctricos 28.26 y 28.44V. Aceptables para la simulación del proceso de soldadura GMAW. Permitiendo establecer una relación directa entre la variación de la corriente y la distribución de temperatura, y a su vez en la transferencia de calor del sistema.

---

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Mauricio Rincón Ortiz. Doctor en Ciencia y Tecnología Mención Materiales. Codirector: Jeferson Owaldo Ruiz Lizarazo. Magíster en Ingeniería de Materiales

Abstract

Title: Computational Simulation of Heat Transfer in AISI-SAE 1020 Steel Using Globular and Spray Mechanisms in GMAW Welding Processes

Author: Jhon Alex Sarmiento Quiroz, Cesar Andrés Tovar Bermúdez

Key Words: Electric arc, Temperature distribution, Current.

Description: The electric arc welding process that produces localized melting of metals by means of a consumable electrode and workpiece, with a protective gas is called the GMAW process. In this we find 4 methods of metal transfer: short circuit, globular, spray and pulsed spray. For this project, a two-dimensional axisimetric model is developed in the COMSOL Multiphysics software. 5.6, which relates the main operational variables for globular transfer and spray in GMAW welding modes, maintaining the current as the process independent variable. Finally, the results of temperature distribution and electrical potential found were compared with previous studies in equal and/or similar currents, obtaining temperature results in the 16000 and 21500K arc in globular and spray transfer mechanisms, respectively. And electrical potential values 28.26 and 28.44V. Acceptable for the simulation of the GMAW welding process. Allowing to establish a direct relationship between the variation of the current and the temperature distribution, and in turn in the heat transfer of the system.

---

* Degree Work

** Physicochemical Engineering Faculty. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: Dr in Science and Technology Material Mention. Codirector: Jeferson Owaldo Ruiz Lizarazo. Material Engineering Magister.

Introducción

La soldadura por arco metálico con gas de protección (GMAW), es un proceso de soldadura que utiliza un arco eléctrico entre un electrodo de metal y el baño de soldadura. El arco eléctrico, a alta temperatura, funde el electrodo formando una gota en la punta de este, la cual se desprende formando un charco de soldadura (Hu & Tsai, 2007).

Los altos niveles de corriente y voltaje afectan significativamente el charco de soldadura, debido a la temperatura de éste, ocasionando deformación sobre la superficie de la pieza soldada. Igualmente, dichos parámetros afectan el flujo del charco, la geometría solidificada del cordón y la transferencia de calor, generando cambios microestructurales y algunos defectos en la soldadura, y en la pieza, como poros y grietas, afectando la integridad y calidad de las juntas soldadas (Peng et al., 2020; Kumar & DebRoy, 2007).

Por lo anterior, el propósito de este estudio fue determinar la variación de la distribución de temperatura respecto a la variación de la corriente aplicada en la transferencia de calor en una placa de acero al carbono AISI-SAE 1020 teniendo en cuenta los mecanismos de transferencia globular y spray, por medio de una simulación computacional utilizando el método de elementos finitos, donde se comparó con datos obtenidos experimentalmente y reportados por el autor (Rosas et al., 2020).

Debido a que las ecuaciones gubernamentales no tienen una solución analítica para la superficie de control desarrollada, se seleccionó la herramienta computacional COMSOL Multiphysics® 5.6, esta herramienta provee el manejo de la física de transferencia de calor en fluidos y sólidos.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Simular computacionalmente la transferencia de calor en los mecanismos globular y spray del proceso de soldadura GMAW de un acero AISI-SAE 1020 considerando las variables operativas.

1.2 Objetivos Específicos

Relacionar matemáticamente las variables operacionales del proceso de soldadura GMAW, con el fenómeno de transferencia de calor en los mecanismos globular y spray.

Desarrollar un modelo numérico mediante el método de elementos finitos para la transferencia de calor, bajo los mecanismos globular y spray del proceso de soldadura GMAW en un acero AISI-SAE 1020.

Determinar el efecto de la corriente y el potencial aplicado al proceso de soldadura GMAW sobre la transferencia de calor en los mecanismos globular y spray.

2. Marco Teórico

2.1 Antecedentes

El estudio de la transferencia de calor en los distintos tipos de soldadura, ha sido objeto de estudio desde hace varios años, debido a los problemas que esto puede traer sobre la pieza de trabajo. Partiendo de 1982, donde (Hsu et al.) ponen las bases para este estudio, afirmando que para simular el arco en la soldadura se debe tener en cuenta la interacción de diferentes efectos, entre los cuales se encuentran los eléctricos, magnéticos, dinámicos de fluido y térmicos. En donde lograron crear un modelo matemático compuesto por siete (7) ecuaciones que describen los fenómenos anteriormente mencionados y se obtuvieron isotermas de temperatura que representan la distribución de temperatura a distintas corrientes aplicadas.

En el año 2017, (Dos Santos Maia Neto et al.) desarrollaron un modelo matemático térmico tridimensional con cambio de fase y adición de material donde se ejecuta la técnica de volumen finito mediante el software C++ Builder 5.0, donde logran validar mediante simulación con datos experimentales, la eficiencia térmica de este modelo en un 92.71%. Dichos autores también reportaron que durante el calentamiento la ausencia del calor latente, como parámetro, ocasionó un aumento continuo en la temperatura de la placa.

Delgado et al., en el 2018 desarrollaron un modelo bidimensional en donde obtuvieron resultados de simulaciones computacionales basadas en los principios de conservación de masa, cantidad de movimiento y las leyes de Maxwell, siendo resueltas con la ayuda del software PHOENICS. Los autores lograron predecir las propiedades eléctricas de la columna del arco, los patrones de flujo, los contornos de temperaturas, el flujo de calor y de potencial eléctrico.

Concluyendo que al incrementar la corriente el arco es más intenso, caliente y transfiere más calor a la pieza de trabajo.

Madariaga, en el 2018 realizó un estudio experimental sobre el efecto de los flux activos aplicados a las soldaduras GMAW en un acero AISI SAE 1020, donde experimentaba con valores de corriente aplicada entre 170A y 250A. Este consistió en una evaluación de los efectos causados por la aplicación de flux como el carbonato cálcico ($CaCO_3$) y el óxido de silicio (SiO_2) sobre el cordón de soldadura con un ambiente controlado. Demostrando que dichos flux tienen influencia en cambios morfológicos como la penetración de la soldadura, y alteraciones en los modos de transferencia.

En 2020, (Ghafouri et al) llevaron a cabo un estudio tridimensional mediante el método de elementos finitos, teniendo en cuenta el cambio de fases en estado sólido para simular la distribución de calor en el cordón de soldadura. Dicho estudio se realizó en una placa de acero S960 MC por medio de soldadura GMAW y con ayuda del software ABAQUS, obteniendo que dicho modelo se aproxima más a los datos experimentales cuando la conductividad de calor es anisotrópica.

Por último, (Peng et al., 2020), proponen un modelo matemático bidimensional mediante el método de elementos finitos Bernstein-Bézier para simular la transferencia de calor en un proceso de soldadura GMAW. En este análisis se planteó una estrategia de refinamiento de la malla, para superar la diferencia de escala de tamaño de esta entre las zonas más cercanas a la fuente de calor y las zonas más lejanas, otorgando así mayor precisión y eficacia a la evaluación del método.

2.2. Fundamentos teóricos de la soldadura GMAW

La soldadura de arco con alambre continuo bajo protección gaseosa GMAW, es un proceso usado en la industria para la unión de metales, que consiste en la producción de un arco para fundir un electrodo en forma de alambre. Dicho metal se transfiere al cordón de soldadura en forma de gotas y varían según el método de transferencia aplicado. (Scotti et al., 2014).

Existen cuatro métodos de transferencia para esta soldadura que se clasifican como: transferencia por corto circuito, transferencia globular, transferencia por spray y transferencia por spray pulsado. La transferencia por corto circuito es donde el metal se deposita durante cortos circuitos repetidos, este abarca los menores rangos de corrientes y diámetros de electrodos (Norrish & Cuiuri, 2014).

2.2.1. Mecanismo de transferencia globular

La transferencia globular, es un mecanismo por el cual el metal se deposita mediante una combinación de cortos circuitos y gotas desprendidas por la gravedad, estas se caracterizan por un tamaño de gota con un diámetro mayor que el del electrodo. Durante el uso de todos los electrodos de alambre sólido para GMAW, hay una transición donde termina la transferencia de cortocircuito y comienza la transferencia globular. Ésta característicamente da la apariencia de grandes gotas fundidas de forma irregular que son más grandes que el diámetro del electrodo. Dichas gotas no siguen un desprendimiento axial al electrodo, como es el caso del spray, sino que pueden caer en el cordón de soldadura o moverse hacia la punta de contacto (Amushahi et al., 2010).

2.2.2. Mecanismo de transferencia spray

La *transferencia spray* es donde el metal se transfiere mediante un flujo de pequeñas gotas fundidas que son impulsadas a través del arco, requieren de mayor energía que los demás mecanismos (Gas Metal Arc Welding: Process Overview, 2003). Es el mecanismo de transferencia de metal de mayor energía, mediante el cual un electrodo de alambre sólido continuamente se deposita a un nivel de energía más alto, lo que resulta en una corriente de pequeñas gotas fundidas, que se impulsan axialmente a través del arco (Gas Metal Arc Welding: Process Overview, 2003).

2.2.3 Transferencia de calor en la soldadura

El fenómeno transferencia de calor del proceso de soldadura GMAW comprende diversos mecanismos asociados como: el flujo del gas de protección, el ambiente en el que se lleva a cabo el proceso, la corriente eléctrica producida por la fuente, el calentamiento electromagnético y la transferencia de calor del electrodo hacia el charco de soldadura (Hsu et al., 1982).

La transferencia de calor en la soldadura es principalmente gobernada por el transporte de calor bajo conducción y/o convección. Este fenómeno está descrito principalmente por los fundamentos de Fourier para el balance de calor, los cuales se presentan de la Ec. 1 a la Ec. 8.

$$u \cdot (\rho C_p \cdot \nabla T) + \nabla \cdot q = Q \qquad \textbf{Ec. 1}$$

El primer término de la Ec. 1 corresponde a la transferencia de calor sensible que se trasmite desde el electrodo hacia el metal base multiplicado por la velocidad del fluido (u) cuando el dominio es convectivo, donde ρ es la densidad del metal, C_p es el calor especifico a presión constante, T es la temperatura.

El segundo término de la ecuación representa la velocidad de adición de energía por conducción de calor en unidad de volumen, siendo q el vector de densidad de flujo de calor y por último, el tercer termino Q es el calor generado por unidad de volumen.

En la Ec. 2, n es el vector de posición del modelo generado por el calor de convección, q_0 es el término de la ecuación por convección.

$$-n \cdot q = q_0 \qquad \textbf{Ec. 2}$$

El vector de densidad de flujo de calor ha sido descrito por la ley de Fourier como:

$$q = -k\nabla T \qquad \textbf{Ec. 3}$$

Siendo k la conductividad térmica. Además, el calor generador lo provee la fuente de poder mediante el calentamiento electromagnético convirtiendo el termino Q en la velocidad de transferencia de calor de la fuente Q_e (Schulz, 2003), por lo que la Ec. 1 quedaría descrita por:

$$u \cdot (\rho C_p \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (k\nabla T) + Q_e \qquad \textbf{Ec. 4}$$

$$Q_e \quad = J \cdot E \qquad \textbf{Ec. 5}$$

Donde J es la densidad de corriente y E es la tensión del arco.

El termino de densidad de corriente está ligado a un circuito eléctrico en el proceso de soldadura, por tanto, se debe modelar bajo los principios de la ley de Ohm:

$$\nabla \cdot J = Q_{j \cdot v} \qquad \textbf{Ec. 6}$$

Donde $Q_{j \cdot v}$ es la densidad de corriente volumétrica, J es la densidad de corriente que es variable a lo largo del electrodo. Donde J es:

$$J = \sigma E + J_e \qquad \textbf{Ec. 7}$$

Siendo σ el parámetro de conductividad eléctrica y J_e es la densidad de corriente efectiva.

Y la tensión del arco (E):

$$E = -\nabla V \qquad \textbf{Ec. 8}$$

Siendo V la caída del potencial del arco eléctrico generado por el equipo de soldadura.

Donde primero se reemplazó la Ec. 7 y Ec. 8 en Ec. 5, luego la ecuación resultante se reemplazó en la Ec. 4 dando como resultado:

$$u \cdot (\rho C_p \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \sigma(-\nabla V)^2 + J_e(-\nabla V) \qquad \textbf{Ec. 9}$$

Velocidad del fluido (u)

El termino de velocidad del fluido descrito en la Ec. 1 se modeló a partir de la Ec. 10, ecuación de continuidad, y la Ec. 11, ecuación de movimiento de fluidos. Dando como resultado la Ec. 12.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho u) = 0 \qquad \textbf{Ec. 10}$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p - [\nabla \cdot \tau] + \rho g \qquad \textbf{Ec. 11}$$

Donde en la Ec 11, el primer término corresponde al transporte convectivo, el segundo y el tercer termino corresponde al transporte molecular, y el último corresponde a las fuerzas externas sobre el fluido.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho u = -[\nabla \cdot \rho u u] - \nabla p - [\nabla \cdot \tau] + \rho g \qquad \textbf{Ec. 12}$$

Donde el primer término, en la Ec. 12, corresponde a la velocidad de incremento de cantidad de movimiento por unidad de volumen, el segundo corresponde a la velocidad de adición de cantidad movimiento por convección por unidad de volumen, el tercer y cuarto termino corresponden a la velocidad de adición de cantidad de movimiento por transporte molecular por

unidad de volumen, y por último, el quinto termino corresponde a las fuerzas externas sobre el fluido.

2.2.4. COMSOL Multiphysics ® 5.6.

COMSOL Multiphysics® es un software de simulación de uso general para modelar diseños, dispositivos y procesos en todos los campos de la ingeniería, la fabricación y la investigación científica (COMSOL INC., 2021). El software es lo suficientemente flexible como para adaptarse a múltiples ecuaciones diferenciales parciales en un solo modelo de dominio. Este software multifísico utiliza el método de elementos finitos para darle solución los sistemas de ecuaciones diferenciales propuestos, que conlleva la división del modelo en diferentes geometrías (tetraedros, prismas, hexaedros, entre otros), donde a cada nodo le corresponderá una ecuación correspondiente a la física implementada, indicando que, a mayor número de elementos usados, mejor será la precisión de la solución.

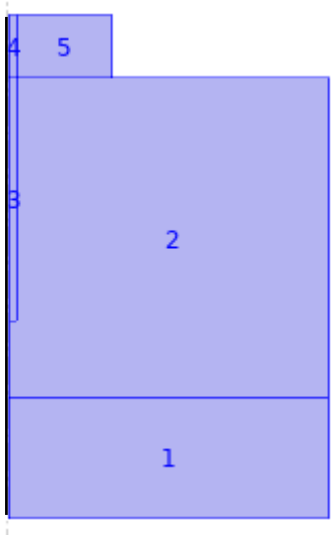
Debido a que las ecuaciones diferenciales expresadas desde la Ec. 1 hasta la Ec. 11 no tienen una solución analítica para la superficie de control desarrollada, se debe hacer uso de un método numérico confiable como el método de elementos finitos. Por consiguiente, para la solución del modelo matemático que incluye la dependencia de los fenómenos de transferencia de calor, distribución de corriente y el flujo de fluidos, se utiliza el software COMSOL Multiphysics® 5.6.

3. Metodología experimental

3.1 Construcción de la geometría de la soldadura en el simulador.

Para la construcción de la geometría, se utilizó un modelo CAD 2D Axisimétrico, es decir, simétrico respecto al eje central y en revolución respecto al eje volumétrico (Ibarguen & Realpe, 2012) como se observa en la Figura 1. Se trabajó bajo este modelo bidimensional axisimétrico a partir de la premisa de que las condiciones de borde no varían en función al tercer eje dimensional, permitiendo disminuir el tiempo de cómputo y los requerimientos de almacenamiento de datos.

Figura 1. *Geometría del sistema de soldadura.*



El modelo geométrico presentado en la Figura 1, se compone de 5 zonas descritas así:

Zona 1. Es un acero al carbono AISI SAE 1020, cuyas dimensiones finales son de 50mm de ancho, 170mm de largo y 9.5mm de alto (Rosas et al., 2020).

Zona 2. Región del flujo de gas, donde sucede el fenómeno de soldadura junto con la evaporación de gases, radiación del plasma.

Zona 3. Es el alambre-electrodo: Corresponde a un electrodo AWS A5.18 – ER70S6, con diámetro de 1.2mm (APENDICE 1), en esta región se tomará el metal en estado sólido.

Zona 4. Alimentación del electrodo: Es la parte del electrodo que se mantiene en fase sólida, donde se arrastra el alambre para crear la alimentación del electrodo. Esta tasa de alimentación está relacionada a la función encontrada por el autor Cristhian (Madariaga; 2018).

Zona 5. Tobera (entrada del flujo de gas): Es la zona donde fluye el gas protector argón con un caudal de 19 litros por minuto.

3.2. Condiciones y consideraciones del modelo

En el modelo se utilizaron coordenadas cilíndricas asumiendo las siguientes condiciones:

a) Tanto el flujo de salida del gas como la alimentación del electrodo son constantes.

b) No se consideran los efectos de los vapores metálicos.

c) Las interacciones entre el arco y la pieza de trabajo no se consideran, y se asume una temperatura de 293K en la superficie de la pieza de trabajo.

d) Las propiedades del gas de protección, argón en el modelo, son ideales y se asume que en la tobera el flujo de gas se suministra estando en régimen laminar.

f) Se analizaron dos fluidos, gas argón y metal proveniente del electrodo AWS A5-18 ER70S6 (APENDICE A). Cuyas propiedades fueron las mostradas en la Tabla 1 y Tabla 2.

g) El tiempo del modelo sólo es válido para tiempos entre 0 y 1 segundo, cuando el arco está encendido.

Tabla 1. *Propiedades del electrodo AWS A5-18 ER70S6 suministradas en COMSOL.*

Parámetros	Valor	Unidad
Densidad (ρ)	7200	kg/m³
Viscosidad dinámica (μ)	0.006	Pa·s
Flujo másico del electrodo (Fm)	7.1678E-4	kg/s
Flujo volumétrico del electrodo (Flu)	9.9553E-8	m³/s
Permitividad relativa (ε)	0	-
Área del electrodo (Ae)	1.131E-6	m²
Flujo volumétrico del electrodo (Flu)	9.9553E-8	m³/s

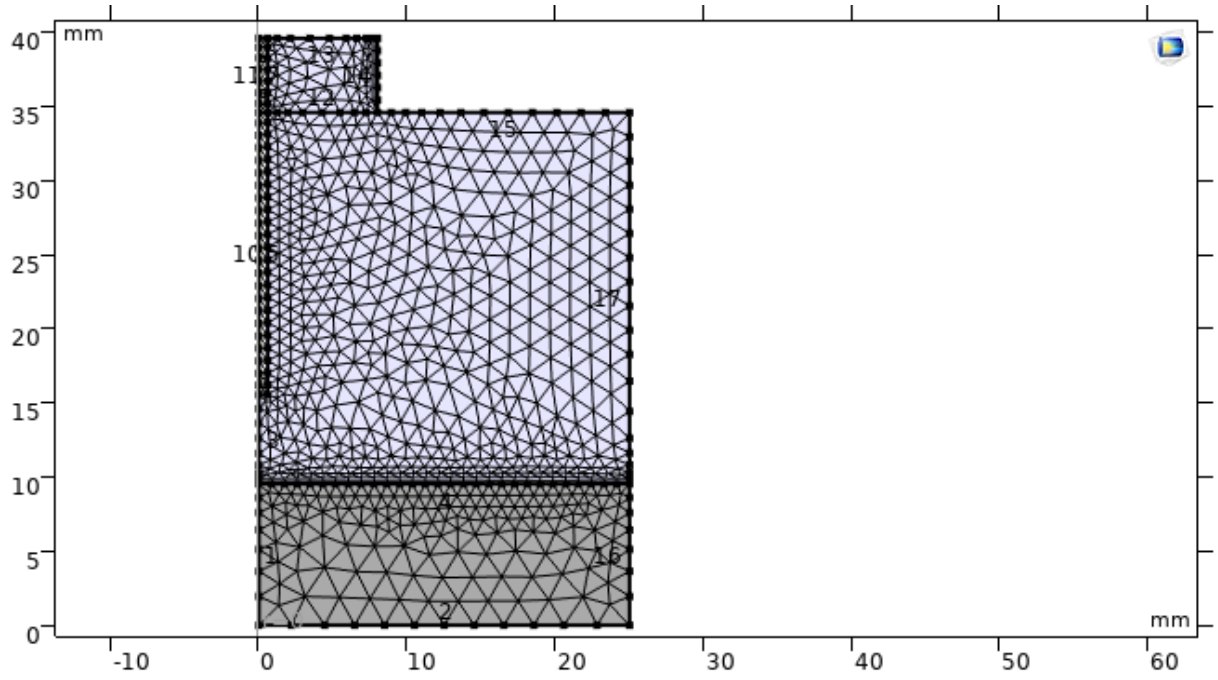
Tabla 2. *Propiedades del gas argón suministradas en COMSOL.*

Parámetros	Valor	Unidad
Conductividad eléctrica (σ)	0.001	W/(m·K)
Permitividad relativa (ε)	1.005	-
Caudal del gas (Q)	3.1667E-4	m³/s
Radio Mayor (R mayor)	0.008	m
Radio Menor (R menor)	6E-4	m
Área (A)	1.9993E-4	m²

Condiciones de malla

A continuación, se muestra cómo se distribuye el mallado de la geometría para la resolución del modelo en COMSOL.

Figura 2. *Mallado establecido en el software COMSOL Multyphisic®.*



El mallado suministrado fue de tamaño normal compuesto por 1569 elementos, de los cuales 1501 fueron triángulos y 68 cuadrados. La calidad media de elemento fue de 0.8207, el cual representa una calidad aceptable para los criterios de simulación (Mayor a 0.7).

4. Resultados y discusión

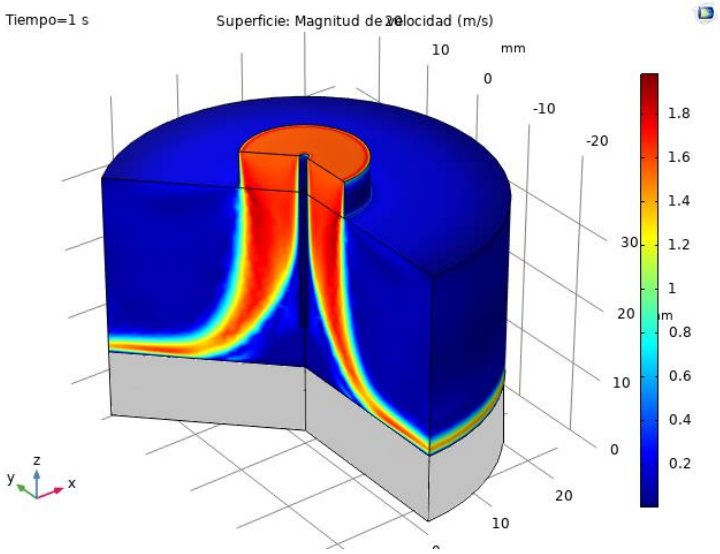
El modelo de simulación se llevó a cabo en dos etapas, la primera en estado estacionario con el fin de modelar el comportamiento de los flujos de entrada y salida del gas, y del metal en cuestión de balance de masa y energía. Mientras que en el segundo se realizó el modelado del calor generado, a partir de las corrientes eléctricas.

4.1. Estudio 1. Estado estacionario: Flujo de fluidos

Este estudio tuvo como objetivo modelar el comportamiento del flujo de entrada y salida del gas de protección, tomando como base el balance de masa y energía descrito en la Ec. 8., por lo que no se contemplan variaciones de caudal en el gas de protección.

En la Figura 3, se presenta el flujo del gas de protección (argón 100%) a través de la superficie de control (electrodo, placa y ambiente), la distribución de flujo del gas está representada por una escala de colores; el color rojo indica las zonas mayor velocidad de flujo y el color azul las zonas donde el gas no circula.

Figura 3. *Distribución del flujo de gas de protección, Argón.*



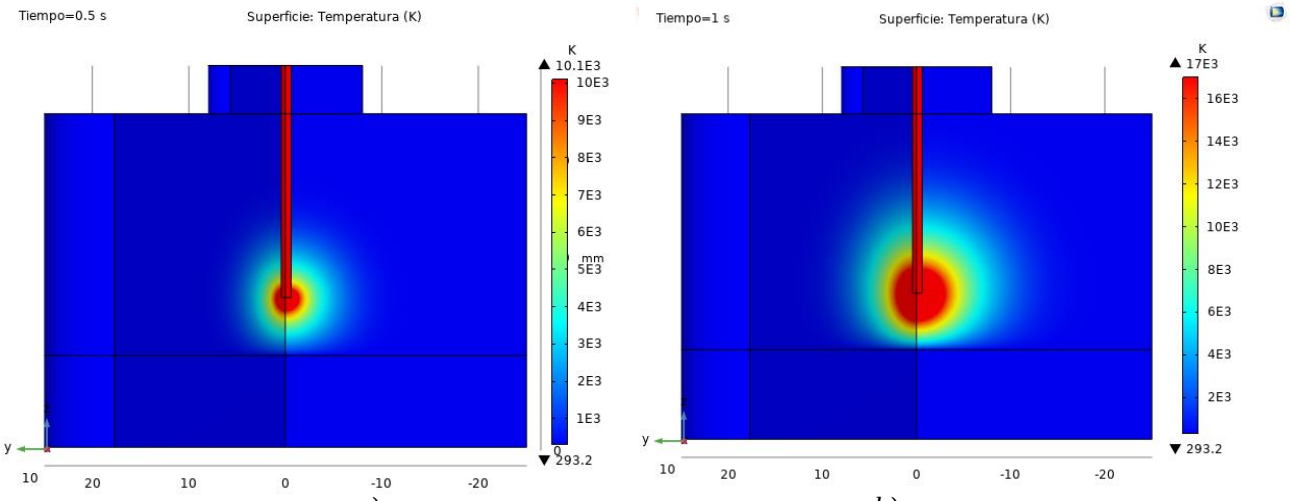
Se trabajó con un gas de protección en régimen laminar, como se ve en la Figura 3, desde la tobera se desprende el argón teniendo un recorrido vertical descendiente con una inclinación convexa que se aleja del electrodo, y a su vez, dando comienzo a la protección del ambiente del arco eléctrico y el baño de soldadura. Este gas tuvo una velocidad de salida de 1.8m/s, esto ayuda a la estabilización del arco permitiendo una mejor visibilidad del arco y baño de soldadura, manteniendo al mismo tiempo la protección adecuada (Carburos Metalicos Grupo Air Products, 2001).

4.2. Estudio 2. Estado transitorio: Distribución de corriente y temperatura

Lo siguiente que se evaluó en el estudio 2, fue el mecanismo de transferencia globular a una corriente de 200 A. Del mismo modo, la transferencia por spray se manejó a una corriente 230A.

La distribución de temperatura está representada por una escala de colores; el color rojo indica las zonas con altas temperaturas y el color azul las zonas de bajas temperaturas.

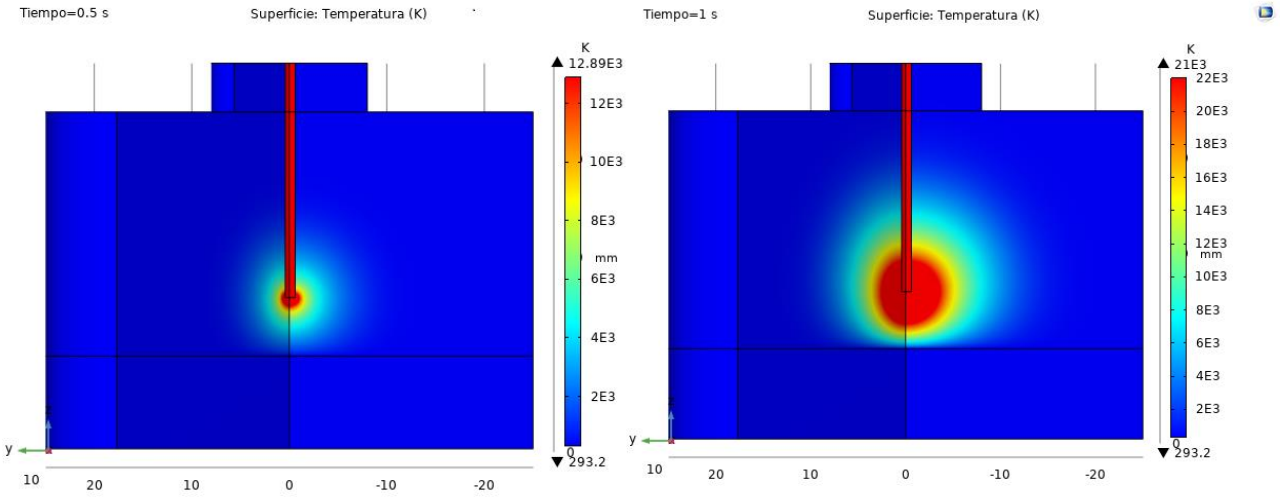
Figura 4. *Distribución de temperatura a corriente de 200A. (a) pasado 0.5 segundos; (b) pasado 1 segundo.*



a) *b)*

En la Figura 4. muestra el incremento del tamaño del arco eléctrico con respecto al tiempo, se hallaron valores de temperaturas desde el centro del arco hasta 6 mm radialmente, que van desde 16000k hasta 9000K respectivamente.

Figura 5. *Distribución de temperatura a corriente de 230A. (a) pasado 0.1segundos; (b) pasado 1 segundo.*



a) *b)*

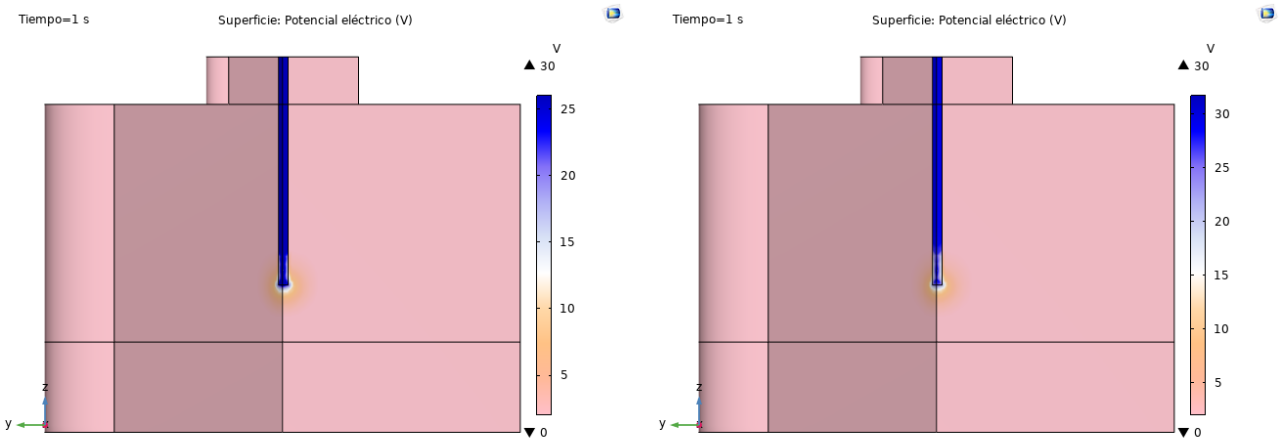
En relación a 230A de corriente correspondiente a la Figura 5, se encontró al inicio del proceso una temperatura en el centro del arco de aproximadamente 12000K. Por otro lado, pasado un segundo de iniciado el proceso, se encontraron valores de temperatura de 21500K en el centro del mismo.

En los alrededores del arco eléctrico, se observaron temperaturas desde 12000K hasta los 21500K, a longitudes de 6mm hasta el centro del arco, respectivamente.

Otro parámetro importante de análisis dentro de este estudio es el potencial eléctrico, el cual es representado igualmente con una escala de colores en la Figura 6. El color rosado indica

valores de potencial iguales a 0, mientras que el color azul indica un potencial que varía entre 28 y 29V.

Figura 6. *Potencial eléctrico (V) del sistema a) 200A. y b) 230A*



a) *b)*

En la Figura 6. está representado la distribución del potencial eléctrico a lo largo del electrodo, se observa una pérdida de potencial eléctrico en la punta del electrodo. Esta caída de potencial es ocasionada por el desprendimiento de las gotas en la punta del electrodo hacia el charco de soldadura.

Tabla 3. *Comparación de las condiciones de operación que el potencial eléctrico.*

Trabajos	Autores	Electrodo	Gas de protección	Corrientes evaluados (A)	Velocidad de alimentación (m/min)	Potencial eléctrico (V)
Efectos de los flux activos sobre soldaduras GMAW aplicadas a un acero AISI SAE 1020	C. Madariaga	ER70S6 – 1.2 mm	Ar-4%CO_2	200	5.0	28.6
				230	6.5	27.6
Simulación Computacional de la Transferencia de Calor en un Acero AISI-SAE 1020 Mediante los Mecanismos Globular y Spray en Procesos de Soldadura GMAW	J. Sarmiento & C. Tovar	ER70S6 – 1.2 mm	Ar	200	5.28	28.26
				230	6.55	28.44

Como se observa en la Tabla 3, para este modelo se encontraron valores de potencial eléctrico de 28.26V para 200A y 28.44V para 230A. Igualmente, (Madariaga, 2018) en su investigación sobre los efectos de los flux activos sobre soldaduras GMAW aplicadas a un acero AISI SAE 1020, en las mismas condiciones iniciales, obtuvo valores de potencial eléctrico de 28.6 y 27.6 V para corrientes de 200 y 230A, respectivamente.

Los resultados del modelo son comparados con los experimentales (Madariaga, 2018) para determinar un porcentaje de error del modelo propuesto, en cuanto a potencial eléctrico. Encontrando porcentajes de error para de 1.18% y 3.04% para 200 y 230A, respectivamente. Ver (APENDICE C).

A pesar de haber planteado nuestro modelo con los datos de (Madariaga, 2018), se encontraron estos porcentajes de error probablemente debido a que se tomó como gas de protección Ar 100% y no Ar-4%CO_2.

En cuanto a la velocidad de alimentación del modelo, fueron tomados los resultados encontrados por (Madariaga, 2018) con el fin de hacer una interpolación para ingresar al modelo como un parámetro fijo para cada corriente especifica, 5.28 y 6.55m/min para 200 y 200A, respectivamente (APENDICE D).

Obteniendo como velocidad de alimentación la Ec. 13, un valor constante para cada corriente aplicada:

$$y = 0{,}0396x - 2{,}7143 \qquad \textbf{Ec. 13}$$

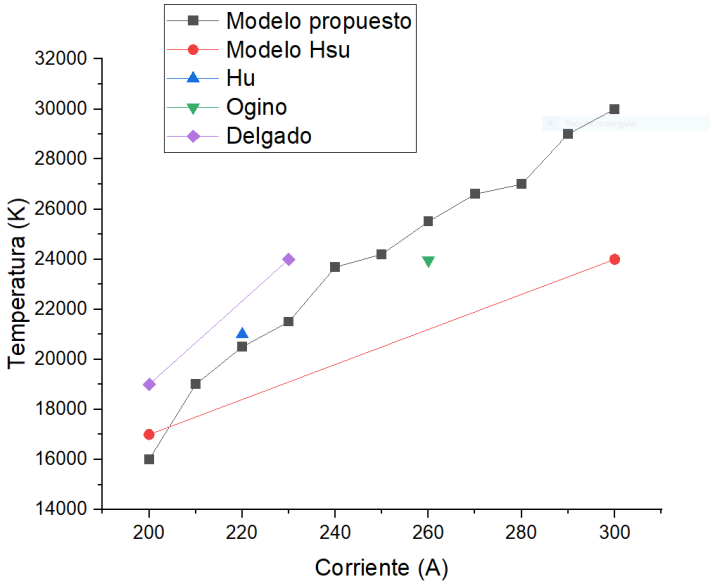
En donde $\boldsymbol{y}$ es la velocidad de alimentación en función y $\boldsymbol{x}$ representa la corriente que se aplica.

Teniendo en cuenta que no se encuentra una variación significante entre los potenciales encontrados, no se pudo establecer una relación entre el efecto de la variación del potencial y el flujo de calor. Lo anterior puede estar asociado a que no se tuvo en cuenta el cambio de fase del electrodo.

4.3. Efecto de la corriente en la transferencia de calor

Para validar los resultados se comparó el modelo propuesto con otros modelos propuestos por diferentes autores como indica la Tabla 4 y en la Figura 7. La zona del mecanismo de trasnferencia globular va desde un rango de corriente de 200 a 220A . Por otro lado, el mecanismo spray comprende valores entre 230 a 280A.

Figura 7. *Comparación de resultados para las temperaturas encontradas, entre los autores referenciados.*



En la Figura 7 se puede apreciar los valores de temperatura que obtuvieron los diferentes autores a determinados valores de corrientes como se muestra en la Tabla 4, en relación con las obtenidas en el modelo planteado.

Tabla 4. *Artículos comparados para la validación del modelo.*

Artículos	Autores	Años	Electrodo	Gas utilizado	Método de solución	Corrientes evaluados (A)	Temperaturas encontradas (K)
Study of the freeburning high intensity argon arc	K. C. Hsu	1983	Acero dulce – 1.2 mm	Ar	Diferencias finitas	100 200 300	14.000 17.000 24.000
Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part I: The arc	J. Hu	2007	Acero dulce – 1.6 mm	Ar-2%O_2	Ecuación hiperbólica en derivadas parciales	220	21.000
Numerical simulation of GMAW process using Ar and an Ar–CO2 gas mixture	Yosuke Ogino	2015	Acero dulce – 1.2 mm	Ar-18%CO_2	Método SMAC	260	23.960
Efecto de la corriente y la longitud de arco en soldaduras con arco eléctrico asistido por modelado matemático	J. A. delgado	2018	EWTh-2%-1.6mm	Ar	Volumen de control	200 230	19.000 24.000

Teniendo en cuenta el modelo propuesto en este trabajo para una corriente de 200A y bajo mecanismo de transferencia globular, se encontró una temperatura en el arco de 16.000K, mientras que (Hsu et al., 1983) obtuvo una temperatura en el arco de 17.000K trabajando con un electrodo de acero dulce con un mismo diámetro de 1.2mm. Por otro lado, (Delgado et al., 2018) encontró una temperatura en el arco de 19.000K trabajando con un electrodo EwTh-2% de 1.6mm de diámetro para un proceso GTAW. Esta comparación entre GMAW y GTAW es válida debido a que tanto GTAW como GMAW tienen un arco de plasma entre el electrodo y la pieza de trabajo. Del mismo modo, aunque GTAW tiene un cátodo de tungsteno inerte como electrodo y GMAW un metal de fusión generalmente establecido como ánodo, el modelo de arco GTAW se puede adoptar para modelar el arco GMAW (Hu et al, 2007).

El resultado obtenido de temperatura referente al modelo propuesto en este trabajo, es de una magnitud menor en relación a los trabajos anteriormente enunciados, siendo el valor más distante 3000K por encima (Delgado et al., 2018) y el más cercano 1000K por encima (Hsu et al., 2983), lo cual puede ser causado debido a que estos dos autores en sus modelos determinan el flujo de fluido aportado mediante el uso de las ecuaciones de Navier-Stokes en régimen turbulento (Vazquez, 2004), mientras que el flujo masico de este trabajo está regido por la variación en volumen y transferencia de gotas del metal de aporte (APENDICE B, Figura A).

Para un valor de 220A de corriente, se encontró una temperatura en el arco de 20500K para el modelo planteado, mientras que (Hu et al., 2007) encuentra una temperatura en el arco de 21000K. Esta comparación varía en 500K, respecto al modelo propuesto, lo cual puede ser ocasionado por la diferencia de diámetro entre los electrodos, puesto que a una mayor área

transversal ésta opone una menor resistencia al flujo de corriente a través de si (Aguado, 1998). Otra posible cause también se le atribuye al uso de un gas mixto de protección, entre Ar y O_2 (2%).

Para el caso de 230A, en mecanismo spray, se encontró un valor de temperatura en el arco de 21500K. (Delgado et al., 2018) obtuvo una temperatura en el arco de 24000K, a esta misma corriente. Obteniendo una diferencia de 2500K la cual es atribuida por los motivos expuestos en la comparación anterior a 200A.

Tomando una corriente de 260A, el modelo propuesto arrojó una temperatura en el arco de 25500K. Por otro lado, (Ogino et al, 2015) encuentra una temperatura de arco de 23960K para un electrodo de acero dulce y diámetro 1.2mm utilizando un gas de protección mixto entre Ar y CO_2 (18%), para este mismo valor de corriente. Así mismo, (Ogino et al, 2015) en su modelo tiene en cuenta factores eléctricos y térmicos provenientes del metal base, y los efectos de vapores metálicos, dando como resultado valores de temperaturas de arcos diferentes al modelo propuesto.

Por último, se evidencia un aumento en la temperatura de 5000K, respecto al alcanzado en el arco en el modelo propuesto, transcurrido 1 segundo, al variar las corrientes entre mecanismos globular y spray. Encontrando que la temperatura del arco se eleva a medida que se aumenta la magnitud de la corriente suministrada. Por ende, un plasma de mayor intensidad de corriente transfiere mayor calor por mecanismos electromagnéticos, y por efecto de la conducción y convección aplicada (Martín, 2014).

5. Conclusiones

Existe relación directamente proporcional entre las variables operacionales (corriente, velocidad de alimentación y potencial de corriente) y la transferencia de calor en el proceso de soldadura GMA. Esto se determinó a partir de un modelo de simulación que involucró los fenómenos de transporte de calor por conducción-convección y calentamiento electromagnético, bajo los mecanismos de transferencia globular y spray, para un acero AISI SAE 1020 y un electrodo AWS A5.18 – ER70S6.

En la solución del modelo matemático se usaron 1569 elementos de tamaño normal, obteniendo una calidad media de elemento 0,82 y 93 segundos de computo, donde se encontraron valores de temperatura máxima en el arco para los mecanismos de globular y spray de 16.000K y 21.500K, respectivamente y valores de potencial eléctrico de 28.26V y 28.44V, respectivamente, pasado 1 segundo del encendido del arco.

Se encontró que la temperatura aumentó linealmente con la variación de corriente y mediante el modelo de simulación obtenido se abarcaron todos los valores de corriente impuesta en los modelos de solución desarrollados por los autores: Hu, Hsu, Ogino y Delgado. A partir de esto, se comprobó que el modelo propuesto obtuvo temperaturas similares a las encontradas por dichos autores, teniendo en cuenta que los modelos variaron en las condiciones tales como: gas protección, diámetro y composición química del electrodo y método numérico.

Referencias Bibliográficas

Amushahi, M. H., Ashrafizadeh, F., & Shamanian, M. (2010). *Characterization of boride-rich hardfacing on carbon steel by arc spray and GMAW processes*. Surface and Coatings Technology, *204*(16–17), 2723–2728.

C. Heinze, C. Schwenk, y M. Rethmeier (2012), *"Numerical calculation of residual stress development of multi-pass gas metal arc welding"*, Journal of Constructional Steel Research, vol. 72, págs. 12–19.

Chen, X., Yu, G., He, X., Li, S., & Li, Z. (2020). *Numerical study of heat transfer and solute distribution in hybrid laser-MIG welding*. International Journal of Thermal Sciences, 149(November 2019), 106182.

Cristhian Harley Madariaga Rosas. (2018). *Efectos de los flux activos sobre soldaduras GMAW aplicadas a un acero AISI/SAE 1020*, Universidad Industrial De Santander.

COMSOL Inc®. (2021). *The COMSOL® Software Product Suite.* Estados Unidos. Recuperado de: https://www.comsol.com

Delgado, Ramirez & Méndez. (2018). *Efecto de la corriente y longitud de arco en soldaduras con arco eléctrico asistido por modelado metálico.* Universidad Nacional Autónoma de México

Dennis, J. H., Hewitt, P. J., Redding, C. A. J., & Workman, A. D. (2001). *A model for prediction of fume formation rate in gas metal arc welding (GMAW), globular and spray modes, DC electrode positive*. Annals of Occupational Hygiene, *45*(2), 105–113.

Dos Santos, E. B. F., Pistor, R., & Gerlich, A. P. (2017). *High frequency pulsed gas metal arc welding (GMAW-P): The metal beam process*. Manufacturing Letters, 11, 1–4.

F. Kong, J. Ma, and R. Kovacevic (2011), "*Numerical and experimental study of thermally induced residual stress in the hybrid laser-GMA welding process*," Journal of Materials Processing Technology, vol. 211, no. 6, pp. 1102–1111.

Gas Metal Arc Welding: Process Overview, 96 (2003) (testimony of Jeff Nassan). https://m.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWires-SuperArc-SuperArcLA-90/c4200.pdf

Hernandéz, J. L., Colmenar, A. (2014*). Fundamentos y problemas de electrostática, corriente continua, electromagnetismo y corriente altera*. Ra-Ma®, 49–50 (Martín, 2014).

Hu, J., & Tsai, H. L. (2007). Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part I: The arc. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *50*(5–6), 833–846.

K.C. Hsu, K. Etemadi, and E. Pfender. *Estudy of the free-burning high-intensity argon arc.* American Institute of Physics (1983). Heat transfer division, *Department of Mechanical Engineering.* University of Minnesota, Minneapolis, Minessota 55455.

Kumar, A., & DebRoy, T. (2007). *Heat transfer and fluid flow during gas-metal-arc fillet welding for various joint configurations and welding positions*. Dinar, 38(3), 506–519.

LINCOLN ELECTRIC (2014), *Gas Metal Arc Welding.* Cleveland, OH, U.S.A: Lincoln Global Inc.

María José Aguado Benedí (1998). *Resistencia de la piel al paso de la corriente eléctrica en adultos trabajadore,* Universidad Complutense de Madrid.

Martín, J. L. (2014). Fundaments y problemas de electrostática, corriente continua, electromagnetismo y corriente alterna. En J. L. Martín, *Fundaments y problemas de electrostática, corriente continua, electromagnetismo y corriente alterna* (pág. 705). Madrid: Ra-Ma.

Norrish, J., & Cuiuri, D. (2014). *The controlled short circuit GMAW process: A tutorial*. Journal of Manufacturing Processes, *16*(1), 86–92.

P. J. Modenesi and A. Queiroz Bracarense, (2012) *Introdução à Física do Arco Elétrico E sua Aplicação na Soldagem dos Metais.* Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte.

Peng, X., Xu, G., Zhou, A., Yang, Y., & Ma, Z. (2020). *An adaptive Bernstein-Bézier finite element method for heat transfer analysis in welding*. Advances in Engineering Software, 148(June), 102855.

Quintino, L., Liskevich, O., Vilarinho, L., & Scotti, A. (2013). *Heat input in full penetration welds in gas metal arc welding (GMAW).* International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 68(9–12), 2833–2840.

Romero, S. (2012). *Influencia del modo de transferencia por arco pulsado en el proceso de soldadura GMAW con alambre compuesto con núcleo metálico sobre la soldabilidad del acero ASTM A131 grado AH32*. Universidad Nacional de Colombia.

Rosas, C. H. M., Modenesi, P. J., & Ortiz, M. R. (2020). *Efectos de los Active Flux sobre Soldaduras GMAW Aplicadas a un Acero AISI/SAE 1020*. Soldagem & Inspeção, 25, 1–12.

S. Kou, John Wiley and Sons, (1996), "*Transport Phenomena in Materials Processing"*, New York.

Salas-Banuet, G., Jaime, O., Baena, R., Cockrell, B. R., Ramírez-Vieyra, J., & Noguez-Amaya, M. E. (2012). *La química y la ciencia e ingeniería de los materiales*, Universidad Nacional de Colombia Dyna, 79, 70–96.

Saraev, Y. N., Lunev, A. G., Semenchuk, V. M., & Nepomnyashchii, A. S. (2020*). Heat and Mass Transfer Kinetics in Arc Welding Process*. Russian Physics Journal, 62(9), 1573–1579.

Schulz, B. (2003). *Introducción a la metalurgia*. Introducción a La Metalurgia, 188–201.

Scotti, A., Ponomarev, V., & Lucas, W. (2014). *Interchangeable metal transfer phenomenon in GMA welding: Features, mechanisms, classification*. Journal of Materials Processing Technology, 214(11), 2488–2496.

Vazquez, J. L. (2004). *La ecuación de Navier-Stokes. Un reto físico-matematico para el siglo XXI.* Monografías de la Real Academia de Ciencias de Zaragoza. 31–56.

APENDICES

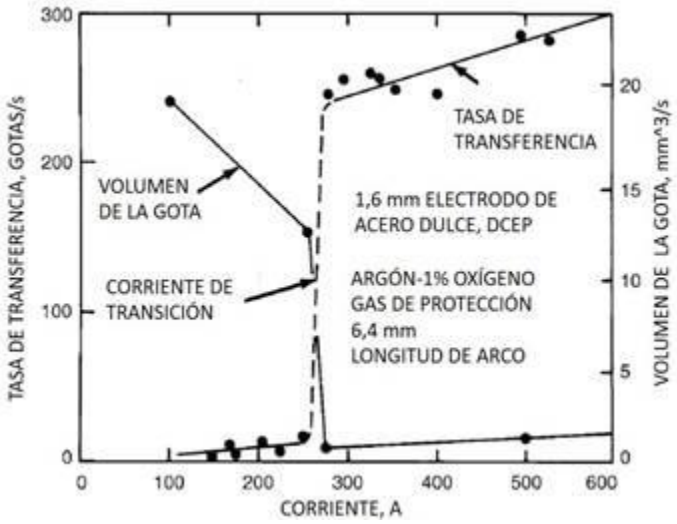
Apéndice A.

Tabla A. Composición química del alambre-electrodo AWS A5.18 – ER70S6

	C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni	Cr	Mo
%	0,086	1,57	0,86	0,012	0,014	0,018	0,019	0,016	0,006

Apéndice B.

Figura A. Variación en volumen y tasa de transferencia de gotas



American Welding Society. "Welding Handbook Welding Processes, Part 1". Annette O'Brien - Editor. 9 Edición: Canadá, p. 788. 2004. ISBN: 0-87171-729-8

Apéndice C.

Ec. A. Porcentaje de error

$$\left|\frac{(Valor\ teorico - Valor\ experimental)}{Valor\ teorico}\right| \cdot 100\% = \%De\ error \qquad \textbf{Ec. A}$$

Apéndice D. Velocidad de alimentación del electrodo

Tabla B. Velocidad de alimentación encontrados por (Madariaga, 2018).

Corriente aplicada (A)	Velocidad de alimentación (m/min)
170	4,2
180	4,4
190	4,8
200	5
210	5,4
220	6,2
230	6,5

Figura B. Variación en volumen y tasa de transferencia de gotas

