



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA DEL
PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO CON
ELECTRODO REVESTIDO. SMAW.**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

CARLOS ANDRÉS SALAZAR HERNANDEZ

carlos.salazar02@epn.edu.ec

JUAN PABLO CAÑAS MORENO

juan.canas@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. HOMERO BARRAGÁN. M. Sc.

homero.barragan@epn.edu.ec

Quito, Octubre 2021

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado en su totalidad por los señores **CARLOS ANDRÉS SALAZAR HERNÁNDEZ** y **JUAN PABLO CAÑAS MORENO**, bajo mi supervisión.

Ing. Homero Barragán M. Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros **Carlos Andrés Salazar Hernández** y **Juan Pablo Cañas Moreno** declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría y no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional anterior; y que se han consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en el presente documento.

A través de la presente declaración cedemos los derechos correspondientes de este trabajo a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Carlos Andrés Salazar Hernández

Juan Pablo Cañas Moreno

DEDICATORIA

A mi madre y padre, que han sido y serán mi apoyo incondicional en todas las etapas de mi vida.

Carlos Salazar

A todas las personas que han estado durante mi carrera universitaria, en especial a mi madre que ha sido el mayor apoyo en mi vida.

Juan Pablo Cañas

AGRADECIMIENTO

Al Ing. Homero Barragán por habernos guiado durante la realización de esta tesis y también ser uno de los mejores maestros que hemos tenido durante la carrera.

A los Ingenieros de la facultad por entregarnos sus conocimientos en cada clase.

A nuestros padres que han sido el motor de nuestra vida.

A nuestras enamoradas Melyna y Jeannine que nos han apoyado incondicionalmente, nos han tenido paciencia y han dado cariño durante toda la etapa universitaria.

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| Resumen..... | X |
| Abstract..... | XI |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| Objetivo general | 2 |
| Objetivos específicos | 2 |
| 1. MARCO TEÓRICO | 3 |
| 1.1 Proceso SMAW | 3 |
| 1.1.1 Fundamento teórico..... | 3 |
| 1.1.2 Variables principales..... | 4 |
| 1.1.2.1 Corriente de soldadura (I)..... | 4 |
| 1.1.2.2 Voltaje en el arco (V) | 5 |
| 1.1.2.3 Velocidad de soldadura | 6 |
| 1.1.3 Arco voltaico para soldadura | 7 |
| 1.1.3.1 Tipos de corriente y polaridad en la soldadura..... | 7 |
| 1.1.3.2 Polaridad para corriente directa (DC) | 7 |
| 1.2 Análisis energético..... | 8 |
| 1.2.1 Eficiencia térmica | 8 |
| 1.2.2 Distribución de temperatura en el proceso SMAW (López, Montenegro, & Estupiñan, 2008)..... | 9 |
| 1.2.2.1 Modelos analíticos de transferencia de calor en la soldadura | 9 |
| 1.2.2.1.1 Tipo de fuente de calor..... | 9 |
| 1.2.2.1.2 Geometría | 10 |
| 1.2.2.1.3 Condiciones iniciales y de frontera | 10 |
| 1.2.2.2 Modelado de la distribución de temperatura durante el proceso de soldadura | 11 |
| 1.2.2.2.1 Estados en la soldadura | 12 |
| 1.2.2.2.2 Modelo de la fuente de calor | 12 |
| 1.2.2.2.3 Fuente puntual estacionaria e instantánea en un sólido semi-infinito | 16 |
| 1.2.2.2.4 Fuente puntual en movimiento en un sólido semi-infinito..... | 17 |

| | | |
|-----------|---|----|
| 1.2.2.2.5 | Fuente lineal en movimiento en una placa delgada | 20 |
| 1.2.3 | Tipos de mecanismos de transferencia de calor | 22 |
| 1.2.3.1 | Conducción | 22 |
| 1.2.3.2 | Convección..... | 22 |
| 1.2.3.3 | Radiación | 22 |
| 1.3 | Calorímetro y termopares | 23 |
| 1.3.1 | Calorímetro..... | 23 |
| 1.3.2 | Termopares | 24 |
| 2. | METODOLOGÍA..... | 26 |
| 2.1 | Parámetros para el proceso SMAW..... | 26 |
| 2.2 | Materiales..... | 26 |
| 2.3 | Equipos de medición | 26 |
| 2.4 | Método de evaluación de la eficiencia térmica..... | 27 |
| 2.4.1 | Obtención de datos..... | 27 |
| 2.4.2 | Cálculo del calor absorbido por el material base durante la soldadura | 27 |
| 2.4.3 | Cálculo del calor absorbido por el calorímetro después de la soldadura..... | 28 |
| 2.4.4 | Cálculo de la eficiencia térmica | 29 |
| 2.5 | Montaje del experimento..... | 30 |
| 3. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 34 |
| 3.1 | Datos obtenidos..... | 34 |
| 3.2 | Datos calculados | 35 |
| 3.3 | Discusión de resultados..... | 38 |
| | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 40 |
| 3.4 | Conclusiones..... | 40 |
| 3.5 | Recomendaciones..... | 41 |
| | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 43 |
| | ANEXOS | 44 |
| Anexo 1: | Ejemplo de cálculo | 44 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Fig. 1.1 Circuito de soldadura SMAW | 4 |
| Fig. 1.2 Tabla de amperajes | 5 |
| Fig. 1.3 Longitud de arco | 6 |
| Fig. 1.4 Tipos de corriente y polaridad | 8 |
| Fig. 1.5 Geometría para el análisis de distribución de temperatura..... | 10 |
| Fig. 1.6 Temperatura del cordón de soldadura..... | 11 |
| Fig. 1.7 Etapas en el proceso de soldadura..... | 12 |
| Fig. 1.8 Sistemas de coordenadas para la modelación de la distribución de temperaturas en el proceso SMAW..... | 13 |
| Fig. 1.9 Esquema de fuente de calor distribuida a) en área, b) en volumen | 15 |
| Fig. 1.10 Esquema de fuente momentánea..... | 15 |
| Fig. 1.11 Esquema de fuente continua..... | 16 |
| Fig. 1.12 Esquema de fuente de función escalón..... | 16 |
| Fig. 1.13 Representación de la fuente puntual en movimiento..... | 18 |
| Fig. 1.14 Esquema de la solución de la distribución de temperaturas..... | 19 |
| Fig. 1.15 Campos de temperatura que se generan utilizando una fuente puntual en movimiento..... | 20 |
| Fig. 1.16 Campos de temperatura en una placa delgada producidos por una fuente lineal de calor en movimiento..... | 21 |
| Fig. 1.17 Calorímetro adiabático | 24 |
| Fig. 1.18 Termopares..... | 25 |
| Fig. 2.1 Puntos de medición en la placa..... | 30 |
| Fig. 2.2 Puntos de medición en placas soldadas | 31 |
| Fig. 2.3 Fijación de termopares en clavos..... | 32 |
| Fig. 2.4 Fijación de termopares en clavos en placa soldada | 32 |
| Fig. 2.5 Calorímetro | 32 |
| Fig. 2.6 Termopar en el calorímetro | 33 |
| Fig. 3.1 Gráfica de eficiencia vs amperaje por espesor de placa..... | 37 |
| Fig. 3.2 Gráfica de eficiencia vs electrodo utilizado..... | 37 |
| Fig. 3.3 Gráfica de eficiencia vs Velocidad de soldadura | 38 |
| Fig. 3.4 Grafica de Eficiencia vs Amperaje por electrodo | 38 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 3.1 Datos de temperatura de la experimentación del proceso de soldadura SMAW | 34 |
| Tabla 3.2 Datos de espesor, coordenadas, voltaje, amperaje y tiempo de soldadura del proceso de soldadura SMAW | 35 |
| Tabla 3.3 Resultados del método de evaluación de la eficiencia del proceso de soldadura SMAW | 36 |

Resumen

En el presente documento de titulación se determinará la eficiencia térmica del proceso de soldadura SMAW mediante el uso de un calorímetro que a su vez validará un modelo matemático utilizado para la determinación de campos de temperaturas, potencia suministrada y eficiencia generadas por fuentes de calor en placas planas. Los resultados de eficiencia obtenidos mediante el uso del calorímetro se encuentran en un rango del 65% al 78%, el proceso puede presentar un valor mayor o menor de eficiencia dentro de este rango, dependiendo de factores como la velocidad de soldadura, electrodo y potencia suministrada por la máquina soldadora. El modelo matemático será validado al comparar el calor obtenido por el calorímetro y el calor calculado con el modelo, debido a que el error que presenta esta comparación es lo suficientemente bajo como para determinar la eficiencia con este modelo.

Eficiencia térmica, SMAW, Calorímetro.

Abstract

In this document, the thermal efficiency of the SMAW welding process will be determined through the use of a calorimeter that will validate a mathematical model used to determine temperature fields, power supplied and efficiency generated by heat sources in flat plates. The efficiency results obtained by using the calorimeter are in a range of 65% to 78%, the process show a higher or lower efficiency value within this range, depending on factors such as welding speed, electrode and power supplied by the welding machine. The mathematical model will be validated by comparing the heat obtained by the calorimeter and the heat calculated with the model, due to the error presented by this comparison is low enough to determine the efficiency with this model.

Thermal Efficiency, SMAW, Calorimeter.

INTRODUCCIÓN

El proceso de soldadura SMAW, es uno de los procesos más utilizados. Como en todo proceso energético existen pérdidas de energía en forma de calor, mientras menores sean estas pérdidas se habla de un proceso más eficiente.

Conocer el valor de eficiencia de un proceso de soldadura podría ayudar a escoger parámetros óptimos, calcular costos de producción por pérdidas energéticas, escoger el proceso adecuado de soldadura, etc. Utilizar procesos que presenten una baja eficiencia puede incurrir en pérdidas económicas, ya que se utiliza una cantidad mayor de energía, se necesita más tiempo para soldar representando esto una mayor cantidad de horas hombre lo que significa un costo mayor por mano de obra en el proceso. La soldadura también podría presentar una mala calidad al no conocer los parámetros y características del proceso de soldadura utilizado.

Poder validar el método matemático permitirá determinar la eficiencia de procesos de soldadura similares obteniendo simplemente datos de temperatura alrededor de una placa plana. Esto brinda la facilidad de obtener la eficiencia de un proceso sin la necesidad de un calorímetro y cálculos adicionales. También ya obtenido y comprobado el rango de eficiencia en el proceso de soldadura SMAW, se puede calcular diferentes temperaturas en cualquier punto de la placa, potencia absorbida por la placa y otros valores que pueden ser de interés, por medio de la ecuación del modelo matemático utilizado.

Objetivo general

Determinar experimentalmente la eficiencia térmica en el proceso de soldadura SMAW.

Objetivos específicos

Validar un modelo matemático para el cálculo de la eficiencia térmica del proceso de soldadura SMAW y similares mediante un calorímetro.

Determinar la eficiencia a diferentes niveles de energía.

Determinar las pérdidas de calor en el material base

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Proceso SMAW

1.1.1 Fundamento teórico

El proceso SMAW es un proceso de soldadura por arco eléctrico entre un material base y un electrodo revestido, el cordón de soldadura recibe una protección mediante la descomposición del revestimiento, sin aplicar presión y con material de aporte del mismo electrodo. (American Welding Society, 2021)

En este proceso se produce una coalescencia de metales gracias al calor del arco eléctrico que se mantiene entre la superficie del material base y la punta de un electrodo revestido. (LINCOLN ELECTRIC)

El electrodo está formado por un núcleo formado de una varilla de metal sólido el cual se encarga de suministrar metal de aporte en la unión cuando este se funde. El electrodo consta de un revestimiento el cual envuelve toda la superficie de la varilla en el núcleo, las funciones principales que tiene este revestimiento es proteger el metal fundido de la atmósfera y estabilizar el arco eléctrico, por medio de los gases que se producen en la descomposición del revestimiento debido al calor generado en el proceso. El revestimiento y el tipo de alambre en el núcleo son los que caracterizan la composición química, estructura metalúrgica y propiedades mecánicas del metal de soldadura. El electrodo tiene un revestimiento de distintos materiales según su aplicación. (LINCOLN ELECTRIC)

La soldadura inicia en el momento que el arco eléctrico es encendido entre la superficie del material base y la punta del electrodo. El arco eléctrico produce una cantidad enorme de calor que funde el metal base y la punta del electrodo. Al fundirse la punta del electrodo forma pequeñas gotas de metal fundido que se transfieren por el chorro del arco eléctrico hacia el material base fundido o también llamado charco de la soldadura. (LINCOLN ELECTRIC)

El metal de aporte se deposita conforme se consume el electrodo. El arco se desplaza sobre la pieza o elemento de trabajo con una velocidad de desplazamiento y una longitud de arco apropiada y controlada, fusionando una parte del metal base y añadiendo metal de aporte para que se pueda realizar la unión de los elementos.

En la figura 1.1 se puede observar cómo está configurado el circuito de soldadura del proceso SMAW.

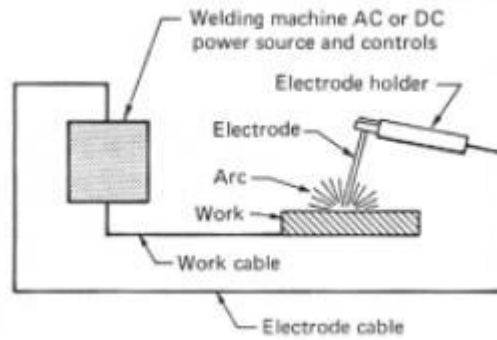


Fig. 1.1 Circuito de soldadura SMAW

Fuente: (LINCOLN ELECTRIC)

1.1.2 Variables principales

1.1.2.1 Corriente de soldadura (I)

El amperaje utilizado en la soldadura varía según el tipo y tamaño del electrodo. Este se regula en la propia máquina soldadora. Los electrodos trabajarán de manera correcta en un cierto intervalo de amperajes, este intervalo depende del espesor y el tipo de revestimiento que tenga el electrodo.

El amperaje óptimo para un específico tipo de electrodo depende de varios factores entre los cuales se encuentran la posición de soldadura y el tipo de unión. Se debe elegir el amperaje suficiente para tener una adecuada penetración y fusión del material, pero al mismo tiempo no debe sobrepasar el intervalo de aceptación ya que generaría sobrecalentamientos causando salpicaduras, socavamientos, golpes de arco, fisuras, etc. El fabricante Lincoln Electric especifica el amperaje y polaridad que se deben utilizar para los tipos diferentes de electrodos como se muestra en la tabla de la figura 1.2, de esta manera cada fabricante brinda sus recomendaciones.

| TABLA DE AMPEREJES APROXIMADOS | | | | | |
|---------------------------------------|------------------|--------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| CLASIFICACION | POLARIDAD | Diametro y Rangos de Amperaje | | | |
| | | 3/32 | 1/8 | 5/32 | 3/16 |
| E6010 | CD + | 40-70 | 75-130 | 90-175 | 140-225 |
| E6011 | CA | 50-85 | 75-120 | 90-160 | 120-200 |
| | CD + - | 40-75 | 70-110 | 80-145 | 110-180 |
| E6012 | CA | 95-120 | 95-155 | 125-200 | 115-270 |
| | CD - | 85-110 | 85-145 | 115-190 | 165-260 |
| E6013 | CA | 75-105 | 110-150 | 160-200 | 205-260 |
| | CD+ - | 75-95 | 100-135 | 145-180 | 190-235 |
| E7014 | CA | 80-130 | 120-145 | 140-210 | |
| | CD - | 80-130 | 120-145 | 140-210 | |
| E7018 | CD + | 75-100 | 100-150 | 120-190 | 170-240 |
| E7018HB | CA | 85-110 | 110-160 | 130-200 | 180-270 |
| | CD + | 75-100 | 100-150 | 120-190 | 170-240 |
| E7024 | CA | | | 170-225 | 225-295 |
| | CD + - | | | 160-215 | 215-285 |

Fig. 1.2 Tabla de amperajes

Fuente: (LINCOLN ELECTRIC)

1.1.2.2 Voltaje en el arco (V)

El voltaje y la longitud de arco están directamente relacionados, la longitud de arco es la distancia entre el material base y la punta del electrodo como se puede observar en la figura 1.3. Se debe utilizar una longitud de arco correcta para una soldadura con una buena calidad. Debido a que la transferencia de material de aporte no es constante el voltaje varía al transferirse el material de aporte por el arco eléctrico, aunque se mantenga la longitud de arco constante. Para que las variaciones en el voltaje sean mínimas se debe soldar con la longitud de arco y el amperaje correctos, donde es necesario tener una alimentación del electrodo consistente y constante.

Según la posición de soldadura y el amperaje que se determine, varía la longitud de arco, la clasificación del electrodo y el revestimiento. La longitud de arco es mayor mientras el diámetro del electrodo y el amperaje sean mayores, pero no debe superar el diámetro del núcleo del electrodo.

La longitud del arco debe ser la correcta ya que si es demasiado corta puede ser irregular y lograr un cortocircuito, mientras que si es demasiado larga puede perder la intensidad y no tener la dirección correcta por lo que el metal fundido tenderá a ser dispersado y se provocarán varias salpicaduras disminuyendo la eficiencia del depósito. Con una longitud larga los gases producidos por la descomposición del revestimiento pueden no alcanzar a proteger la soldadura del oxígeno e hidrógeno presentes en el ambiente lo que puede causar porosidad.

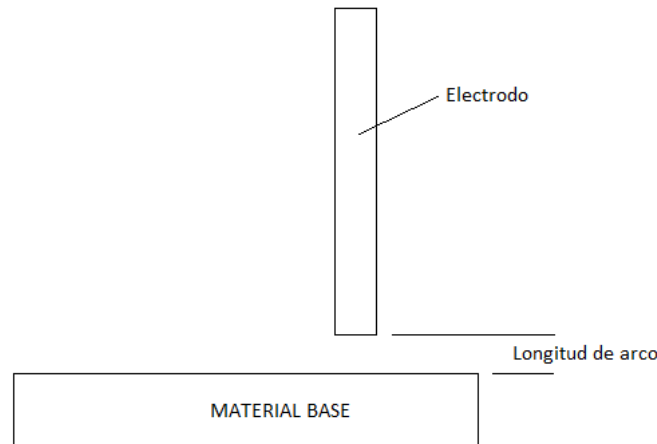


Fig. 1.3 Longitud de arco

Fuente: (Propia)

1.1.2.3 Velocidad de soldadura

La velocidad de soldadura es la rapidez con la que se desplaza el electrodo a lo largo de la soldadura, si es correcta esta rapidez formará un cordón de soldadura con una sección y aspecto correctos. La velocidad debe ser configurada de manera que el arco eléctrico se ubique por delante de la soldadura.

Cuando inicia la soldadura en ese punto se tiene una velocidad alta logrando una buena penetración y un ancho pequeño del cordón, al empezar con el recorrido por el cordón la velocidad aumenta provocando que se reduzca la penetración, lo que causa un deterioro en la superficie del cordón produciendo socavaduras en los bordes de la soldadura donde no se puede eliminar de forma correcta la escoria donde puede quedar atrapados gases, es decir, porosidades en el metal.

Cuando la velocidad es baja el cordón de soldadura será ancho y convexo con poca penetración debido a que el arco no se ubica por delante de la soldadura sino queda en el metal fundido.

El calor que se logra entregar por el arco eléctrico también varía por la velocidad de soldadura, es decir, afecta la estructura metalúrgica de la zona afectada por el calor

(ZAC) y del cordón. Cuando la velocidad es baja se incrementa el calor entregado por lo que aumenta la zona afectada por el calor, reduciendo la velocidad de enfriamiento.

Cuando la tasa de enfriamiento aumenta, la resistencia mecánica y la dureza pueden ser altas en aceros, a excepción de piezas precalentadas para evitar el endurecimiento.

1.1.3 Arco voltaico para soldadura

El arco voltaico es una descarga eléctrica que se mantiene mediante un plasma, es decir, un conductor eléctrico gaseoso. Cuando los electrones por un efecto termoeléctrico pasan a través del plasma ionizado desde el cátodo hacia el ánodo y se condensan, se puede decir que el arco se estabiliza.

Debido a la geometría que se puede encontrar en la interacción entre la punta del electrodo y el plano de soldadura se observa que el arco tiene una forma de campana, lo que favorece una transferencia de metal y esta columna de gas ionizada es eléctricamente neutra.

1.1.3.1 Tipos de corriente y polaridad en la soldadura

En la soldadura se utiliza tanto la corriente alterna (AC) como la corriente directa (DC). Las máquinas AC son las más utilizadas por los operarios en la soldadura debido a que representa una menor inversión en comparación a la compra de una máquina soldadora DC. Esto no significa que las máquinas AC sean las más recomendables, ya que estas no permiten realizar cordones de soldadura tan óptimos y homogéneos como al utilizar corriente directa, debido a que en la corriente alterna la polaridad cambia 120 veces por segundo (para 60 Hz), mientras que en la corriente directa la polaridad se mantiene constante por lo que se tiene un mayor control del cordón el calor que aporta la máquina. (LINCOLN ELECTRIC)

1.1.3.2 Polaridad para corriente directa (DC)

En las máquinas soldadoras DC se puede conectar la pinza porta electrodos al polo positivo o al polo negativo, en cada caso se tendrán diferentes efectos en la soldadura. (LINCOLN ELECTRIC)

En la polaridad directa la pinza porta electrodo se conecta en el polo negativo de la máquina soldadora, lo que provoca que el flujo de electrones viaje desde el electrodo hacia el material base. En este caso el material base alcanzará una temperatura mayor al del electrodo. Los efectos que se presentan en la soldadura son de mayor penetración y una tasa de aportación mayor. Esta polaridad

representa una mayor dificultad de control al momento de soldar ya que se debe realizar una soldadura mucha más rápida por la fusión acelerada que tiene el material. (LINCOLN ELECTRIC)

En la polaridad inversa la pinza porta electrodo se conecta en el polo positivo de la máquina soldadora, lo que provoca que el flujo de electrones viaje desde el material base hacia el electrodo. En este caso el electrodo alcanzará una temperatura mayor al del material base. Los efectos que se presentan en la soldadura son de menor penetración y una tasa de aportación menor. Esta polaridad representa un mayor control al momento de soldar y es la polaridad que más se utiliza en los trabajos con SMAW. (LINCOLN ELECTRIC)

En la figura 1.4 se pueden observar los diferentes tipos de polaridad para corriente continua y alterna y como estas afectan al cordón de soldadura.

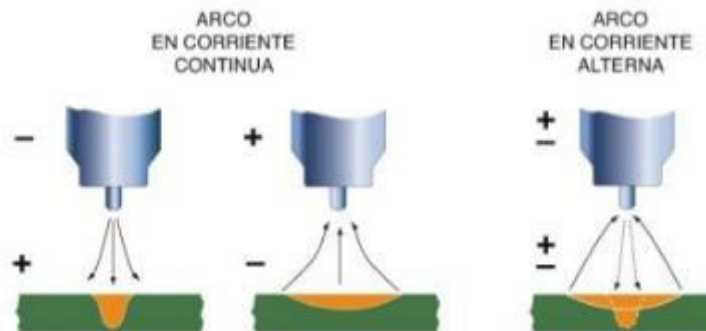


Fig. 1.4 Tipos de corriente y polaridad

Fuente: (Escuela de soldadores de Sevilla, 2020)

Se debe elegir de manera correcta los electrodos de trabajo, ya que estos funcionan con corrientes y polaridades específicas.

1.2 Análisis energético

1.2.1 Eficiencia térmica

En cualquier proceso térmico existe una energía que se desperdicia al momento de realizarlo, es decir, solo una fracción del calor entregado será aprovechada por el proceso. Este calor aprovechado por el proceso es menor al calor total entregado por la fuente. Al relacionar el calor aprovechado por el proceso y el calor total entregado se puede saber la fracción que se aprovechó del calor y a esto se le conoce como eficiencia térmica. (Cengel & Boles, 2015)

En soldadura el calor aprovechado se define como la cantidad de energía que se necesita o requiere para el proceso de soldadura, mientras que el calor total es

aquel que nos entrega la máquina soldadora, es decir, la corriente o el amperaje fijados en la máquina soldadora por el voltaje que se obtiene según la longitud de arco. La cantidad de energía para la soldadura será menor debido a que se perderá energía en los elementos del circuito básico de soldadura. (Cengel & Boles, 2015)

$$\eta = \frac{q_e}{q_T} * 100\%$$

1.2.2 Distribución de temperatura en el proceso SMAW (López, Montenegro, & Estupiñan, 2008)

La temperatura en cualquier punto de la placa al momento de soldarla depende directamente del calor absorbido por esta. El calor que absorbe la placa está definido por las propiedades del material base, por el calor aportado por la fuente, por las condiciones ambientales y la velocidad a la que se realiza la soldadura.

1.2.2.1 Modelos analíticos de transferencia de calor en la soldadura

Para realizar un modelo analítico adecuado de la distribución de temperatura en una soldadura se debe establecer diferentes parámetros, los cuales son:

- Tipo de fuente de calor
- Geometría
- Condiciones iniciales y de frontera

1.2.2.1.1 Tipo de fuente de calor

Los parámetros para la clasificación de fuentes de calor son:

- **Movimiento:** Se refiere a si la fuente se encuentra estática o en movimiento.
- **Dimensiones:** Engloba las especificaciones de la fuente como el tamaño, tipo, potencia, etc.
- **Accionamiento:** Especifica si la fuente actúa o se acciona durante todo el proceso de soldadura o solo durante instantes.

1.2.2.1.2 Geometría

La geometría esta simplificada en una forma que la solución de la distribución de temperatura no sea tan compleja a comparación del análisis con cuerpos reales.

Los diferentes tipos de geometría están representados en la figura 1.5.

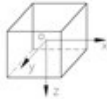
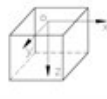
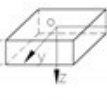
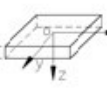
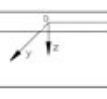
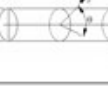
| Designación del cuerpo | Esquema | Región de aplicación | Distribución de flujo de calor | Temperatura de campo |
|------------------------|---|--|--------------------------------|----------------------|
| Infinito |  | $-\infty < x < \infty$ $-\infty < y < \infty$ $-\infty < z < \infty$ | espacial | $T = T(x, y, z, t)$ |
| Semi infinito |  | $-\infty < x < \infty$ $-\infty < y < \infty$ $0 < z < \infty$ | espacial | $T = T(x, y, z, t)$ |
| Placa semi infinita |  | $-\infty < x < \infty$ $-\infty < y < \infty$ $0 < z < \delta$ | espacial | $T = T(x, y, z, t)$ |
| Placa infinita |  | $-\infty < x < \infty$ $-\infty < y < \infty$ $\partial T / \partial z = 0$ | superficial | $T = T(x, y, t)$ |
| Barra Infinita |  | $-\infty < x < \infty$ $\partial T / \partial y = 0$ $\partial T / \partial z = 0$ | lineal | $T = T(x, t)$ |
| Cilindro infinito |  | $0 \leq r < R$ $0 \leq \theta < 2\pi$ $-\infty < z < \infty$ | espacial | $T = T(x, y, z, t)$ |

Fig. 1.5 Geometría para el análisis de distribución de temperatura.

Fuente: (López, Montenegro, & Estupiñan, 2008)

Para placas se debe realizar la distinción entre placas gruesas y delgadas, ya que su solución para la distribución de temperaturas es distinta. Para placas delgadas la distribución de temperaturas se la toma como una distribución superficial. Para placas gruesas la distribución de temperaturas se la toma como una distribución tridimensional.

Para definir si una placa es delgada la razón entre su espesor y la longitud más corta de la placa debe ser menor a 1/10. Si sobrepasa esta razón se considera como una placa gruesa.

1.2.2.1.3 Condiciones iniciales y de frontera

Las condiciones iniciales para la distribución de temperaturas se especifican en un tiempo $t=0$ para un sistema de coordenadas específico, por lo tanto la temperatura

está dada por $T(x,y,z,0)$ que en el caso de la soldadura este valor es constante y uniforme en toda la placa $T(x,y,z,0)=T_0=cte$.

Las condiciones de frontera se forman entre la superficie de la placa y sus alrededores. Las condiciones más comunes en la soldadura son:

- Temperatura superficial constante
- Flujo de calor preestablecido
- Ley de enfriamiento de Newton

1.2.2.2 Modelado de la distribución de temperatura durante el proceso de soldadura

En un proceso de soldadura siempre estarán involucradas temperaturas altas por lo que se debe realizar un estudio térmico. Existen soluciones analíticas de autores que realizan suposiciones para poder simplificar modelos matemáticos complejos y poder tener la distribución de temperaturas correcta. En los modelos se toma en cuenta los perfiles de temperatura y la transferencia de calor en el material. Los modelos son para los casos más comunes de soldadura.

A lo largo del cordón de soldadura existe una esquematización de la temperatura que se muestra en la figura 1.6.

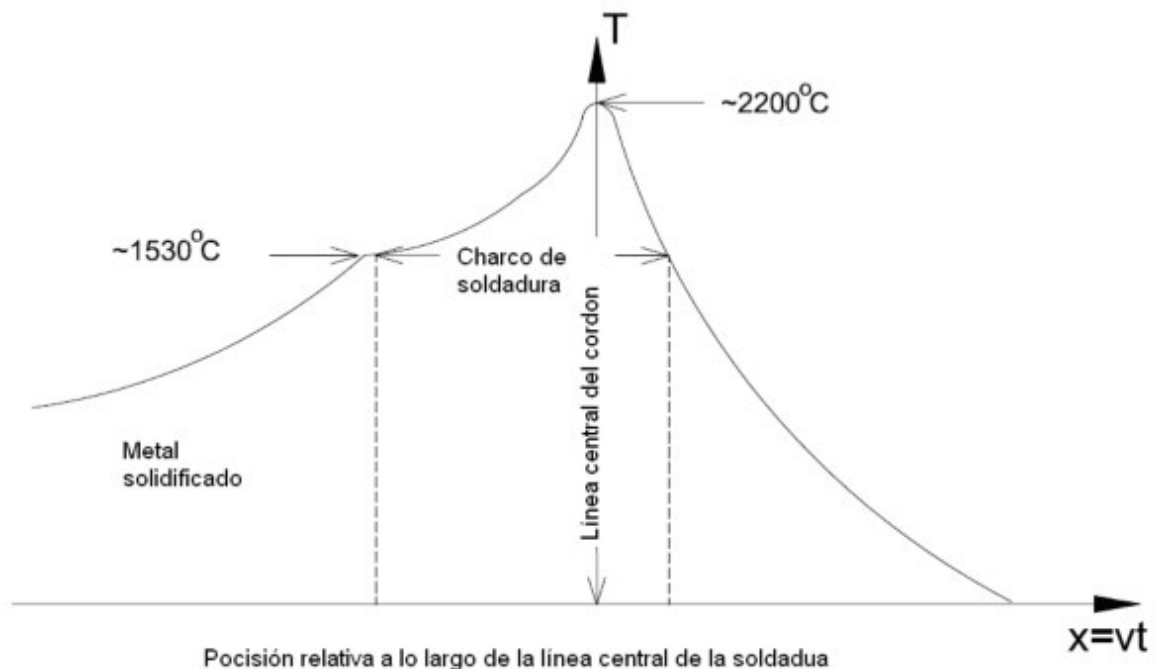


Fig. 1.6 Temperatura del cordón de soldadura.

Fuente: (López, Montenegro, & Estupiñan, 2008)

1.2.2.2.1 Estados en la soldadura

En la soldadura la fuente de calor se encuentra en movimiento, se asume también que esta se mueve en línea recta y a velocidad constante. El perfil de temperatura que se forma será cuasi-estacionario, es decir, en el tiempo la temperatura no varía para un punto que se está moviendo con la fuente de calor. En el inicio y al final de la soldadura se encuentran dos estados que son transitorios.

Los estados que se encuentran en la soldadura están representados en la figura 1.7 y son los siguientes:

- **Etapa inicial:** transitoria debido a que la temperatura alrededor de la fuente empieza a elevarse.
- **Etapa cuasi-estacionaria:** la distribución de temperatura es cuasi-estacionaria a un sistema con origen en la fuente de calor.
- **Etapa final:** la temperatura disminuye debido a que el arco de soldadura se extingue.

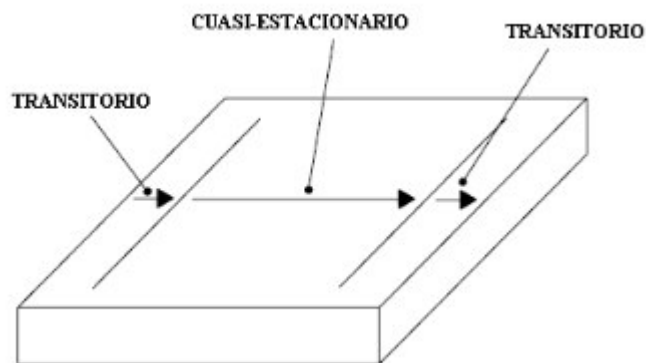


Fig. 1.7 Etapas en el proceso de soldadura.

Fuente: (López, Montenegro, & Estupiñan, 2008)

La etapa transitoria se encuentra en la longitud inicial y final del cordón de soldadura, mientras que por todo el cordón se tiene la cuasi-estacionaria.

1.2.2.2.2 Modelo de la fuente de calor

En la soldadura no toda la energía de la fuente llega a ser energía que se aproveche para elevar la temperatura del material base y del electrodo, mucha energía se pierde por lo que se debe tener en cuenta la eficiencia del proceso.

La fuente de calor para la soldadura es un fenómeno muy complejo ya que está relacionada con distintos campos como son: mecánica de fluidos, fuerzas de tensión superficial, fuerzas de Lorentz, leyes magneto-hidráulicas, etc. Por este motivo en los modelos matemáticos se realiza aproximaciones para simplificar la

complejidad del mismo. La transferencia de masa y calor que se produce entre el electrodo y el material base no se ha logrado entender por completo y por esto se tiene dos tipos de fuentes.

Fuente estacionaria: son aquellas fuentes que en el tiempo no cambian de posición con respecto al sistema de coordenadas, es decir, se mantiene en un solo punto del sólido. Por este motivo se puede modelar con la ecuación diferencial de calor sin ninguna modificación. Su complejidad es menor a una fuente móvil.

Fuente Móvil: el método más popular para calcular la distribución de temperatura es el de Rosental. En este método se considera que la fuente de calor está localizado en un sistema de coordenadas rectangulares que respecto a un sistema de coordenadas estático se mueve a velocidad constante. Un observador que se encuentre en el origen de la fuente o en el sistema de coordenadas móvil podrá ver que no existe una variación de temperatura por eso es llamado cuasi-estacionario, mientras que en el sistema de coordenadas estático se puede observar cambios de la temperatura.

Al establecer los sistemas de coordenadas se puede observar el siguiente esquema como se muestra en la figura 1.8.

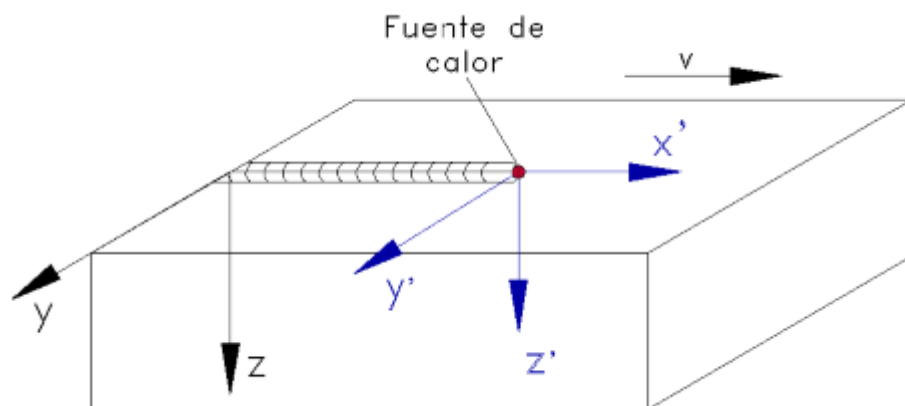


Fig. 1.8 Sistemas de coordenadas para la modelación de la distribución de temperaturas en el proceso SMAW.

Fuente: (López, Montenegro, & Estupiñan, 2008)

Si el coeficiente de conductividad térmico del material en todas las direcciones es constante la distribución de temperatura debe seguir la siguiente ecuación de calor:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Siendo:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \text{ Difusividad Térmica [m}^2/\text{s]}$$

Se reemplazarán los valores del sistema de coordenadas estático por los de las coordenadas que se mueve. Teniendo en cuenta una velocidad constante de la fuente de calor en el eje x positivo entonces se tiene:

$$x' = x - vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

Reemplazando

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y'^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z'^2} = \frac{v}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x'}$$

Siendo v la velocidad constante de la fuente, es decir, la velocidad del sistema de coordenadas.

Las fuentes de calor se dividen por su forma de la siguiente manera:

Puntual: se supone que el calor entra solo a través de un punto hacia el sólido, siendo así la fuente de calor más simplificada

Lineal: se considera una línea finita que brinda el calor para realizar la soldadura.

Con las fuentes puntuales y lineales se presenta varios errores en la distribución de temperaturas, por esta razón se plantean dos modelos de fuentes de calor que son:

Fuente de calor distribuida en áreas: en el proceso de soldadura, la fuente de calor distribuida en un área genera un calor en una capa superficial delgada, por convección y conducción es transferido hacia la placa donde se forma el charco de soldadura y finalmente se dirige hacia el material base. En la figura 1.9a se observa un esquema de la fuente de calor distribuida en área.

Fuente de calor distribuida en volúmenes: el calor que provee la fuente se genera en un volumen de la placa y se transfiere finalmente al material base, según la forma del volumen se puede observar el error que puede provocar cada caso, las formas más comunes y estudiadas de la distribución en volúmenes son:

semiesférica, elipsoidal, doble elipsoide. Siendo respectivamente las que más se acercan a un modelo que refleja la realidad. En la figura 1.9b se observa un esquema de la fuente de calor distribuida en volumen.

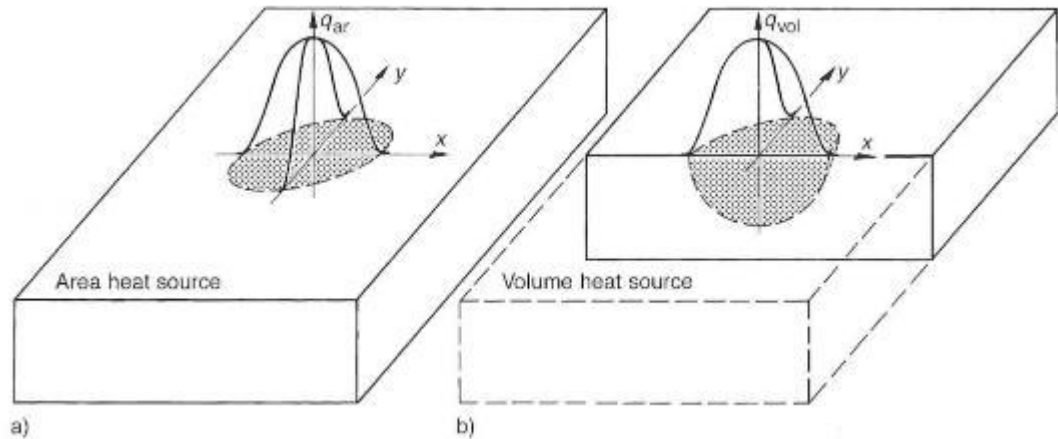


Fig. 1.9 Esquema de fuente de calor distribuida a) en área, b) en volumen

Fuente: (López, Montenegro, & Estupiñan, 2008)

Las fuentes según lo que dura su acción se dividen en:

Fuente momentánea: En este tipo de fuente, el calor que ingresa en un cuerpo lo hace en un tiempo muy corto (Fig. 1.10).

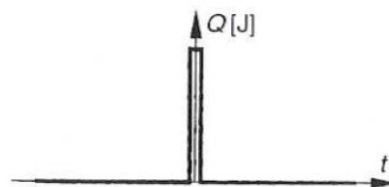


Fig. 1.10 Esquema de fuente momentánea.

Fuente: (López, Montenegro, & Estupiñan, 2008)

Fuente continua: Este tipo de fuente entrega el calor de una manera constante (Fig.1.11).

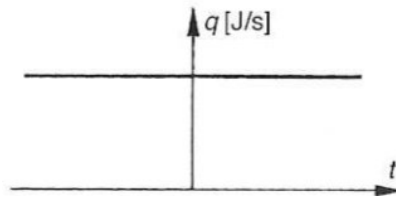


Fig. 1.11 Esquema de fuente continua.

Fuente: (López, Montenegro, & Estupiñan, 2008)

Fuente semejante una función escalón: La fuente de calor está gobernada por una función escalón en la que sus valores pueden ser 0 o un valor constante en un intervalo de tiempo (t_1-t_2) y cambiar de estado en un intervalo de tiempo diferente (Fig. 1.12).

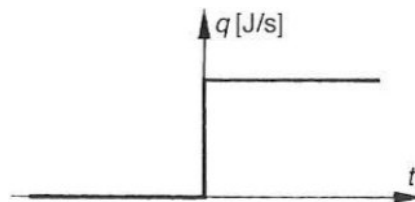


Fig. 1.12 Esquema de fuente de función escalón.

Fuente: (López, Montenegro, & Estupiñan, 2008)

1.2.2.2.3 Fuente puntual estacionaria e instantánea en un sólido semi-infinito

Esta suposición de fuente de calor representa al calor aplicado en un solo punto de un sólido y en un intervalo corto de tiempo. Se puede realizar el análisis para un sólido bidimensional y uno tridimensional, para el primer caso el espesor del sólido es despreciable en el análisis y para el segundo caso el espesor es significativo por lo que se debe analizar al calor en 3 dimensiones. Resolviendo la ecuación diferencial de transferencia de calor con las condiciones de frontera e iniciales adecuadas podemos obtener las siguientes ecuaciones para ambos casos.

Sólido bidimensional:

$$T - T_o = \frac{Q}{\rho C_p (4\pi t)^{\frac{2}{3}}} \exp\left(-\frac{r^2}{4at}\right)$$

Donde:

T = Temperatura en el tiempo t [K]

T_o = Temperatura del cuerpo inicial [K]

Q = Calor neto ingresado [W]

ρ = Densidad del material [K]

C_p = Calor específico $\left[\frac{J}{Kg * K} \right]$

t = Tiempo [s]

$r = (x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}}$ [m]

α = Difusividad térmica del material $\left[\frac{m^2}{s} \right]$

Sólido tridimensional:

$$T - T_o = \frac{Q}{\rho C_p (4\pi\alpha t)^{\frac{3}{2}}} \exp\left(-\frac{R^2}{4\alpha t}\right)$$

Donde:

$R = (x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}$ [m]

1.2.2.2.4 Fuente puntual en movimiento en un sólido semi-infinito

Este tipo de fuente modela a un cuerpo que tiene una temperatura inicial T_o , al cual se le aplica una fuente puntual de calor en el tiempo $t=0$ y que tiene un flujo constante de energía. La fuente puntual de calor es aplicada en el punto $x=0$ y se desplaza positivamente por este eje a una velocidad constante. En la figura 1.13 se representa este tipo de fuente.

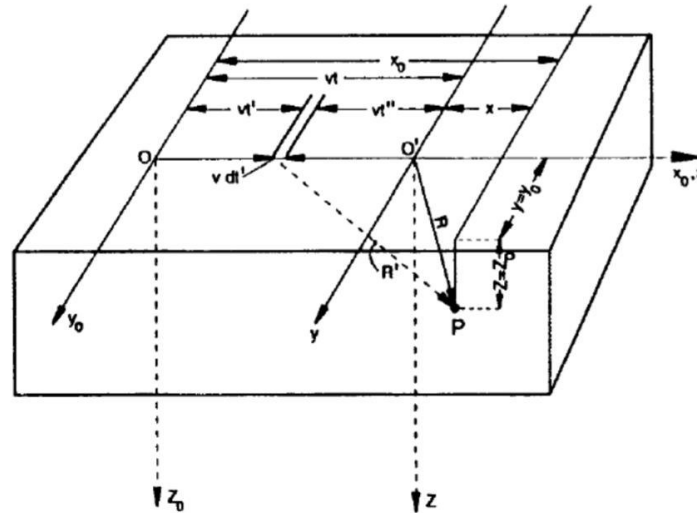


Fig. 1.13 Representación de la fuente puntual en movimiento.

Fuente: (López, Montenegro, & Estupiñan, 2008)

La fuente de calor aumentará la temperatura de manera infinitesimal en un punto P del cuerpo para un tiempo t, lo que originará una distribución de temperaturas las cuales se representan en la figura 1.14 como esquema sobre un sólido, y en la figura 1.15 se representa esta distribución para cada plano del sistema de coordenadas.

$$dT = \frac{2Q dt'}{\rho C_p (4\pi\alpha(t-t'))^{\frac{3}{2}}} \exp\left(-\frac{(R')^2}{4\alpha(t-t')}\right)$$

Donde:

dT = Aumento de temperatura infinitesimal en el tiempo t [K]

C_p = Calor específico $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$

t = Tiempo [t]

$R = (x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}$ [m]

$\alpha = \frac{K}{\rho C_p}$ Difusividad térmica $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

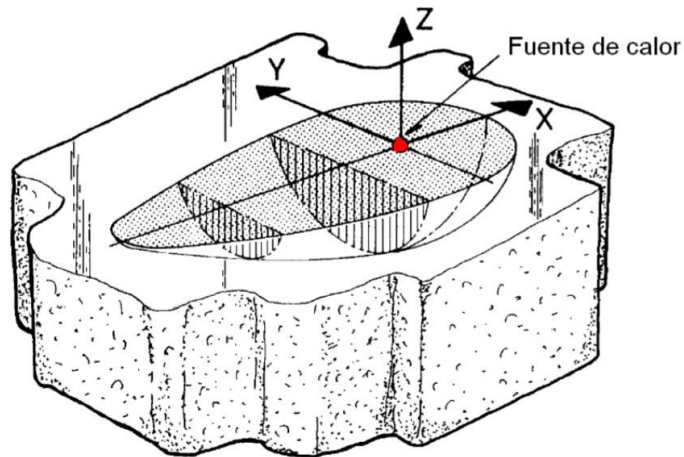


Fig. 1.14 Esquema de la solución de la distribución de temperaturas.

Fuente: (López, Montenegro, & Estupiñan, 2008)

Una vez resuelta la ecuación diferencial de distribución de temperaturas se obtiene la siguiente ecuación.

$$T - T_o = \frac{Q}{2\pi k} \left(\frac{1}{R} \right) \exp \left[-\frac{v}{2\alpha} (R + x) \right]$$

Donde:

T = Temperatura en el tiempo t [K]

T_o = Temperatura inicial del cuerpo [K]

Q = Calor neto ingresado [W]

C_p = Calor específico $\left[\frac{J}{Kg * K} \right]$

$R = (x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}$ [m]

α = Difusividad térmica del material $\left[\frac{m^2}{s} \right]$

v = Velocidad de la fuente de calor $\left[\frac{m}{s} \right]$

k = Conductividad térmica del material $\left[\frac{W}{m.K} \right]$

x = Posición de la fuente de calor en el eje x [m]

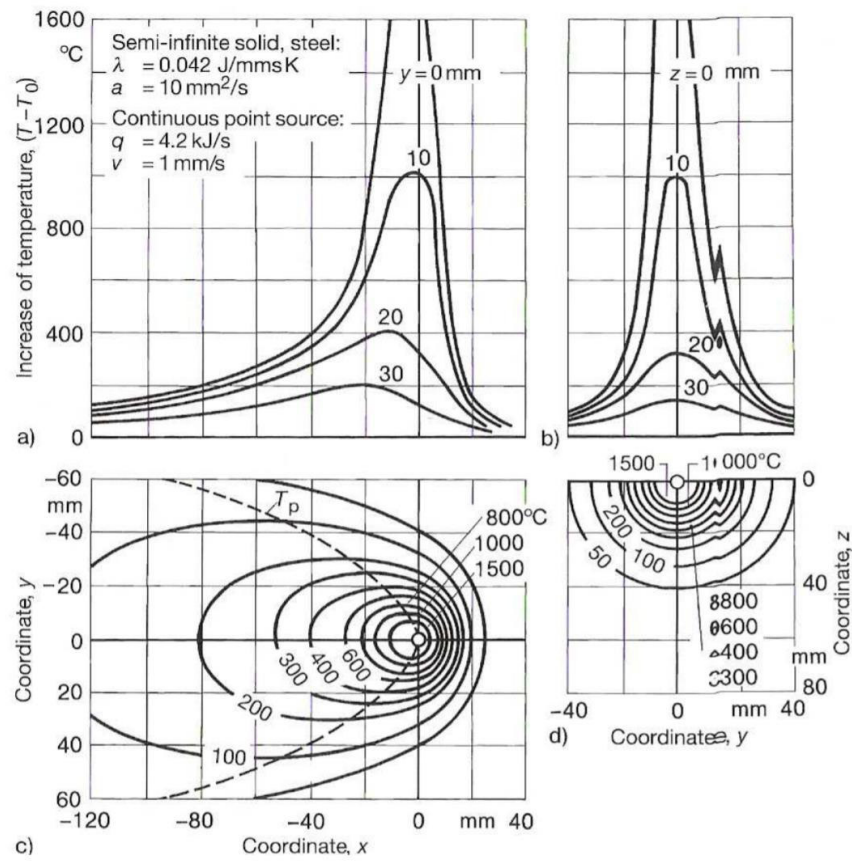


Fig. 1.15 Campos de temperatura que se generan utilizando una fuente puntual en movimiento.

Fuente: (López, Montenegro, & Estupiñan, 2008)

1.2.2.2.5 Fuente lineal en movimiento en una placa delgada

Se tiene la siguiente ecuación para definir el campo de temperaturas para una fuente lineal que se encuentra en movimiento la cual actúa en una placa delgada. La fuente de calor tiene una velocidad constante. En la figura 1.16 se representa la distribución de temperaturas para cada plano del sistema de coordenadas.

$$T - T_o = \frac{Q}{2\delta\pi k} \exp\left(-\frac{vx}{2\alpha}\right) K_o\left(r \sqrt{\left(\frac{v}{2\alpha}\right)^2 + \frac{b}{\alpha}}\right)$$

Donde:

T = Temperatura en el tiempo t [K]

T_o = Temperatura inicial del cuerpo [K]

$Q =$ Calor entregado [W]

$$r = (x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}} \text{ [m]}$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \text{ Difusividad térmica } \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

$$v = \text{Velocidad de la fuente de calor } \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$k = \text{Conductividad térmica del material } \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$$

$x =$ Posición de la fuente de calor en el eje x [m]

$$b = \frac{2(h_c + h_r)}{\rho C_p \delta} \left[\frac{1}{s} \right]$$

$K_0 =$ Función modificada de Bessel de segundo orden

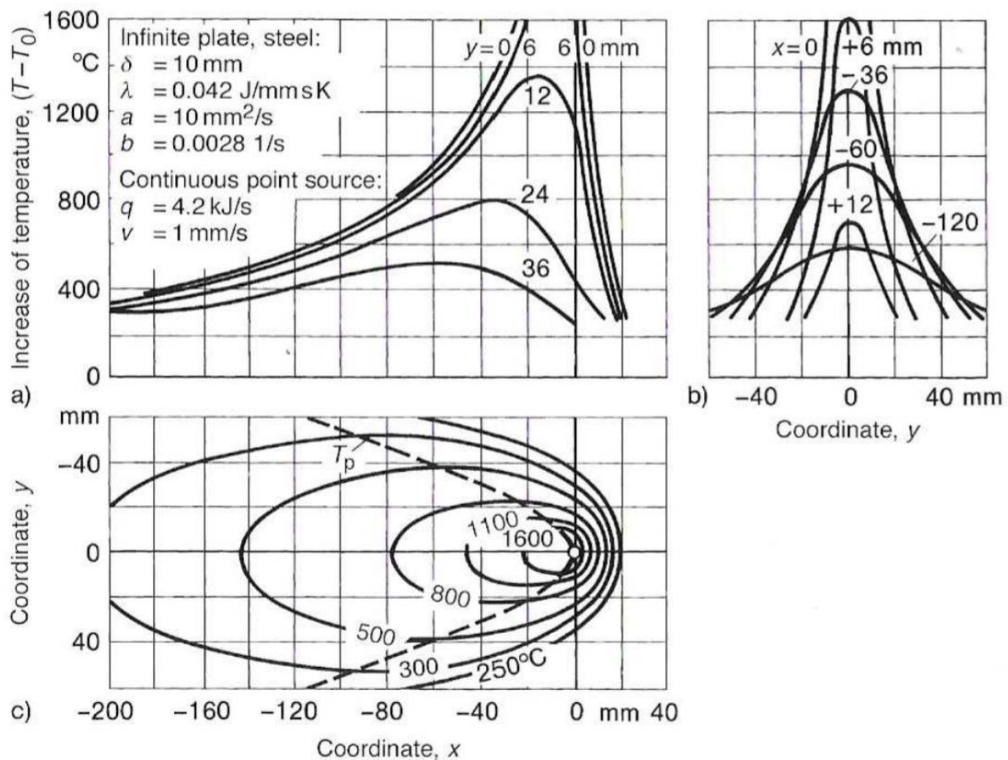


Fig. 1.16 Campos de temperatura en una placa delgada producidos por una fuente lineal de calor en movimiento.

Fuente: (López, Montenegro, & Estupiñan, 2008)

1.2.3 Tipos de mecanismos de transferencia de calor

Existen 3 formas en que el calor es transmitido las cuales son:

1.2.3.1 Conducción

Es la transferencia energética entre las partículas adyacentes de una sustancia y se da de las partículas más energéticas a las menos energéticas.

En líquidos y gases este fenómeno se da a través de colisiones entre sus partículas y en sólidos se da por vibraciones de las moléculas y por electrones libres. (Cengel & Boles, 2015)

1.2.3.2 Convección

La convección es el mecanismo de transferencia de energía entre un sólido y un fluido adyacente a su superficie. Este fluido debe estar en movimiento siendo la tasa de transferencia de calor directamente proporcional a la velocidad del fluido.

La convección combina la conducción y el movimiento de fluidos. (Cengel & Boles, 2015)

1.2.3.3 Radiación

La radiación térmica es la energía que se emite por todos los cuerpos que se encuentran a una temperatura arriba del cero absoluto en forma de ondas electromagnéticas, debido a la temperatura que es un cambio en la configuración electrónica en los átomos.

Este mecanismo de transferencia de calor no necesita ningún medio para propagarse. (Cengel & Boles, 2015)

Al momento de realizar un proceso de soldadura existen estos 3 tipos de mecanismos, por lo cual los 3 mecanismos de transferencia de calor son considerados en el modelo matemático.

Se utiliza un factor convección-radiación que engloba estos dos mecanismos, este factor se puede encontrar en diferentes experimentos previamente realizados. La conducción se considera en las propiedades propias del material, como es la conductividad y difusividad térmica.

1.3 Calorímetro y termopares

1.3.1 Calorímetro

Según el tipo de material y de forma de realizar la medición del calor, se puede decir que existen calorímetros adiabáticos, isotérmicos e isoperibólicos lo que determinará la sensibilidad de la cantidad de calor, estas condiciones de misma temperatura o aislado corresponde a la relación entre la celda y los alrededores. (Godino & Oliva, 2011)

El calorímetro adiabático que se representa en la figura 1.17 consiste en una vasija cerrada que contiene una cantidad de agua conocida y permite introducir un termómetro y un agitador, la función de este agitador es mezclar el agua para que logre tener una temperatura uniforme. Para reducir las pérdidas de calor hacia el exterior el material de la vasija debe ser de un material aislante para que el intercambio de calor entre la probeta ingresada y el agua se realice de forma aislada, es decir, el sistema debe ser adiabático. (Godino & Oliva, 2011)

El sistema que se forma en el interior del calorímetro se basa y responde en el principio de conservación de la energía en donde al tener dos cuerpos en contacto de forma aislada al exterior la cantidad de energía que pierde un cuerpo es igual a la cantidad de energía que gana el otro cuerpo, en el caso del calorímetro la misma cantidad de energía que pierde la probeta ingresada es la misma cantidad de energía que gana el agua del calorímetro. (Godino & Oliva, 2011)

Para determinar la cantidad de energía absorbida por el agua se debe tener en cuenta la energía que es absorbida por los demás elementos del sistema, en este caso el agitador, el termómetro y la vasija del calorímetro. Para el cálculo de esta energía se toma en cuenta una equivalente del calorímetro que es una masa de agua equivalente que absorbe la energía de los elementos del sistema, es decir, es una relación entre la suma de las masas de los elementos del calorímetro por su capacidad calórica y el calor específico del agua. (Godino & Oliva, 2011)

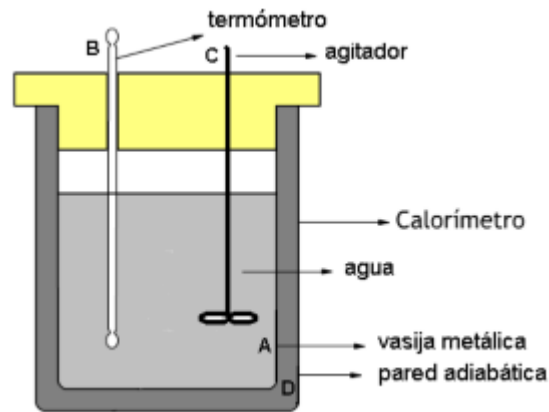


Fig. 1.17 Calorímetro adiabático

Fuente: (Godino & Oliva, 2011)

El calorímetro isotérmico presenta intercambios grandes de calor producidos entre la celda y sus alrededores, los cuales tienen la misma temperatura constante. La resistencia térmica entre la celda y sus alrededores es pequeña. El flujo de calor entre los alrededores y la celda se puede detectar por medio de sensores térmicos. Existe un flujo por la pequeña diferencia que existe entre las temperaturas de la celda y sus alrededores mientras ocurre el proceso. El flujo de calor se registra en el tiempo mediante sensores térmicos el cual se relaciona con la diferencia de temperatura por medio de la resistencia térmica. (García, Moreno-Piraján, & Giraldo, 2007)

El calorímetro isoperibólico mantiene constante la temperatura de los alrededores y la temperatura del sistema varía con el tiempo. (Millán, Gutiérrez, Vera, & Posada, 2016)

1.3.2 Termopares

Los termopares son transductores que miden temperatura compuestos por dos metales diferentes en forma de alambre como se puede observar en la figura 1.18, unidos por el un extremo. Esta unión al calentarse o enfriarse produce una diferencia de voltaje entre los otros dos extremos libres de cada material, este voltaje producido es proporcional a la temperatura que se encuentra en la unión, este fenómeno es conocido como efecto Seebeck. Estos alambres pueden ser de distintas aleaciones y según eso tendrán su rango de temperatura y sensibilidad. (OMEGA, 2020)

Según la aplicación y rango de temperatura se usa distintas combinaciones de metales para los termopares. Los termopares más conocidos son los J, K y T, donde

el tipo K es el más utilizado por un rango muy amplio de temperaturas y un menor costo. Este termopar tipo K es un conductor positivo y negativo de níquel-cromo y níquel-aluminio respectivamente. También existen las tipo B, C, D, G, R y S que están hechas de metales como platino, rodio, tungsteno y renio, por este motivo tienen precios muy altos, pero pueden soportar temperaturas de hasta 2300°C. (OMEGA, 2020)

Los termopares tienen amplios rangos de temperatura por esta razón es necesario tener presentes criterios para escoger el más adecuado. Estos criterios son: resistencia química, rango de temperatura, resistencia mecánica a la abrasión y vibración, además de requisitos de instalación como es el diámetro del termopar o que el equipo sea compatible con el termopar. (OMEGA, 2020)



Fig. 1.18 Termopares

Fuente: (OMEGA, 2020)

2. METODOLOGÍA

2.1 Parámetros para el proceso SMAW

Los parámetros de soldadura para la determinación de la eficiencia térmica del proceso SMAW son los siguientes:

- Voltaje: dependerá de la longitud del arco
- Amperaje: será determinado en la máquina de soldadura

2.2 Materiales

Los materiales a utilizar en la toma de datos para la determinación de la eficiencia térmica del proceso SMAW son los siguientes:

- 5 Placas Metálicas de acero A36 de medidas: 100x100x3
- 5 Placas Metálicas de acero A36 de medidas: 100x100x5
- Electrodo: E6011, E6013, E7018
- Agua

El acero A36 tiene las siguientes propiedades:

$$k = 60,5 \left[\frac{W}{m K} \right]$$

$$\rho = 7850 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$Cp = 460 \left[\frac{J}{kg K} \right]$$

2.3 Equipos de medición

Los equipos de medición a utilizar en la toma de datos para la determinación de la eficiencia térmica del proceso SMAW son los siguientes:

- Termopares: tipo K
- Termómetro digital
- Calorímetro adiabático: fabricado su parte interna por un contenedor de acero para ingresar la pieza y el agua con medidas de 130x130x150mm, en la tapa se instala un motor con una hélice en su rotor para hacer de agitador, se recubre con ladrillos

refractarios de 20mm de espesor para evitar las pérdidas de calor y una carcasa de madera que también funciona como aislante térmico por la baja conductividad de la madera. Además en su tapa tiene un agujero para ingreso el termopar y los cables para el motor del agitador. El calorímetro se puede observar en la figura 2.5 y 2.6.

2.4 Método de evaluación de la eficiencia térmica

2.4.1 Obtención de datos

Los datos necesarios para la determinación de la eficiencia térmica son los siguientes:

Temperatura en la placa: se toma datos de temperatura de la placa antes de soldar, es decir, a temperatura ambiente. En el instante que se termina el cordón de soldadura se toma datos de temperatura en puntos específicos en la superficie de la placa. Para la localización de los puntos de medición se toma una medida prevista los cuales son señalados en las placas. Las coordenadas de las medidas son (50,25) mm y (25,-25) mm tomando como origen el punto medio de un lado de la placa como en la figura 2.1. Los datos de temperatura se toman en el momento en que la fuente de calor se encuentra en el punto final del cordón de soldadura para ambas posiciones.

Temperatura del agua del calorímetro: se toma datos de temperatura del agua antes de ingresar la placa soldada al calorímetro, es decir, a temperatura ambiente. Una vez ingresada la placa se toma la temperatura máxima a la que llega el agua.

Tiempo de soldadura: se toma el tiempo en el que se realiza el cordón de soldadura en la superficie de la placa para el cálculo de la velocidad de soldadura.

2.4.2 Cálculo del calor absorbido por el material base durante la soldadura

Se utilizará el modelo matemático de fuente lineal en movimiento en una placa delgada el cual está representado por la siguiente ecuación:

$$T - T_o = \frac{Q}{2\delta\pi k} \exp\left(-\frac{vx}{2\alpha}\right) K_o\left(r \sqrt{\left(\frac{v}{2\alpha}\right)^2 + \frac{b}{\alpha}}\right)$$

De esta ecuación se despejará el calor absorbido por el material base durante la soldadura.

$$Q = \frac{(T - T_o) 2\delta\pi k}{\exp\left(-\frac{vx}{2\alpha}\right) K_o \left(r\sqrt{\left(\frac{v}{2\alpha}\right)^2 + \frac{b}{\alpha}}\right)}$$

Se reemplazará los datos obtenidos experimentalmente los cuales son temperaturas, coordenadas y velocidad de soldadura. También se reemplazarán las propiedades térmicas del material.

El valor de “b” será asumido según experimentos previamente realizados por otros autores ya que depende del coeficiente de convección-radiación. El valor de “hc+hr”, es decir, el coeficiente de convección radiación se toma de los autores López, M., Montenegro, B., & Estupiñan, P. el cual es de 70 [W/m²*K]

2.4.3 Cálculo del calor absorbido por el calorímetro después de la soldadura

Mediante un calorímetro se puede obtener la energía absorbida por la placa durante el proceso de soldadura. La placa será inmediatamente introducida en el calorímetro una vez terminado el cordón de soldadura. Esta energía se obtiene mediante las temperaturas del agua en el interior del calorímetro y el cálculo de una masa equivalente que corresponde al calor que absorbe diferentes elementos del calorímetro suponiendo un equivalente en agua donde se puede usar la siguiente ecuación de conservación de la energía.

$$E_c = (m_{agua} + m_{eq}) * Cp_{agua} * \Delta T_{agua}$$

Donde:

E_c = energía absorbida por el calorímetro [J]

m_{agua} = masa del agua [kg]

m_{eq} = masa equivalente en agua [kg]

Cp_{agua} = calor específico del agua $\left[\frac{J}{kg K}\right]$

ΔT_{agua} = variación de temperatura en el agua [K]

La masa equivalente en agua se puede calcular de la siguiente manera:

$$m_{eq} = \frac{m_{cal} * Cp_{cal}}{Cp_{agua}}$$

Donde:

m_{eq} = masa equivalente en agua [kg]

m_{cal} = masa de elementos del calorímetro [kg]

Cp_{cal} = calor específico de los elementos del calorímetro $\left[\frac{J}{kg K} \right]$

Cp_{agua} = calor específico del agua $\left[\frac{J}{kg K} \right]$

Dividiendo la energía absorbida por el calorímetro para el tiempo de soldadura se obtiene el calor absorbido por el calorímetro.

$$Q_c = \frac{E_c}{t_s}$$

Donde:

Q_c = calor absorbida por el calorímetro [J]

t_s = tiempo de soldadura [s]

Entre el calor “Q” y el calor “ Q_c ” se obtendrá el error que existe entre el método analítico y experimental, validando así la ecuación del modelo matemático de fuente lineal en movimiento en una placa delgada.

$$e = \frac{Q - Q_c}{Q_c} * 100\%$$

2.4.4 Cálculo de la eficiencia térmica

Una vez que se obtiene el valor del calor absorbido se procede a utilizar la ecuación de la eficiencia térmica que será la siguiente:

$$\eta = \frac{Q_c}{Q_T} * 100\%$$

Donde:

η = eficiencia termica expresada en porcentaje

Q_T = calor total entregado por la fuente [W]

“ Q_T ” depende del amperaje y el voltaje que la máquina de soldadura nos proporciona y la distancia entre la placa base y el electrodo, la potencia será igual a:

$$Q_T = I * V$$

Donde:

$I =$ corriente de la máquina [A]

$V =$ voltaje [V]

2.5 Montaje del experimento

Localización de puntos de medición en las placas

Para la localización de los puntos de medición se toma una medida prevista los cuales son señalados en las placas como se observa en la figura 2.1 y 2.2. Las coordenadas de las medidas son (50,25) mm y (25,-25) mm tomando como origen el punto medio de un lado de la placa.

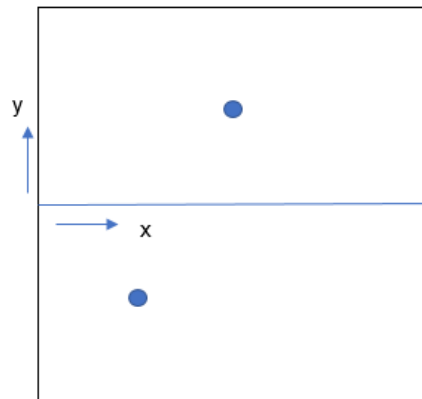


Fig. 2.1 Puntos de medición en la placa

Fuente: (Propia)



Fig. 2.2 Puntos de medición en placas soldadas

Fuente: (Propia)

Fijación de termopares

Los termopares son fijados mediante la soldadura de un clavo de diámetro y masa despreciables en los puntos de medición. El termopar se sujeta a la base del clavo sin hacer contacto entre ambos conductores del termopar como se observa en la figura 2.3 y 2.4, los conductores no deben tener contacto ya que al cuantificar la temperatura en materiales metálicos causa errores de medición por lo que debe existir una pequeña separación.



Fig. 2.3 Fijación de termopares en clavos

Fuente: (Propia)



Fig. 2.4 Fijación de termopares en clavos en placa soldada

Fuente: (Propia)

Medición de temperatura en el calorímetro

Una vez soldada la placa se quitan los termopares de los clavos y se lleva placa al interior del calorímetro el cual se representa en la figura 2.5.

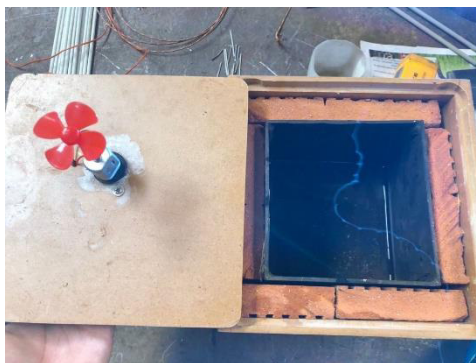


Fig. 2.5 Calorímetro

Fuente: (Propia)

En el calorímetro se inserta un termopar para la medición de la temperatura del agua, esta debe ser agitada para que exista una temperatura uniforme en toda la masa del agua como se observa en la figura 2.5 y 2.6



Fig. 2.6 Termopar en el calorímetro

Fuente: (Propia)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Datos obtenidos

A continuación en las tablas 3.1 y 3.2 se presenta los datos obtenidos de la experimentación de la determinación de la eficiencia del proceso de soldadura SMAW en el laboratorio de soldadura de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. Estos valores son tomados al momento que la fuente de calor se encuentra en el final del cordón de soldadura.

| Placa | Electrodo | Posición | Temperatura final de la placa [°C] | Temperatura inicial de la placa [°C] | Temperatura final agua [°C] | Temperatura inicial agua [°C] |
|-------|-----------|----------|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 1 | E6011 | 1 | 185,6 | 27,7 | 29,5 | 20,4 |
| | | 2 | 117,1 | 27,7 | 29,5 | 20,4 |
| 2 | E6011 | 1 | 186,4 | 26,2 | 31,2 | 18,8 |
| | | 2 | 108,5 | 26,2 | 31,2 | 18,8 |
| 3 | E6011 | 1 | 186,4 | 27,1 | 33,4 | 20,1 |
| | | 2 | 91,6 | 27,1 | 33,4 | 20,1 |
| 4 | E6013 | 1 | 312,8 | 26,6 | 40,3 | 20,2 |
| | | 2 | 302,6 | 26,6 | 40,3 | 20,2 |
| 5 | E6013 | 1 | 326,1 | 26,8 | 41,3 | 20,1 |
| | | 2 | 308,6 | 26,8 | 41,3 | 20,1 |
| 6 | E6013 | 1 | 167 | 26,9 | 42,6 | 20,8 |
| | | 2 | 194,7 | 26,9 | 42,6 | 20,8 |
| 7 | E6013 | 1 | 265,4 | 25,8 | 47,5 | 20,8 |
| | | 2 | 259,1 | 25,8 | 47,5 | 20,8 |
| 8 | E7018 | 1 | 312,6 | 25,5 | 53,3 | 20,7 |
| | | 2 | 297,4 | 25,5 | 53,3 | 20,7 |
| 9 | E7018 | 1 | 322,4 | 25,3 | 55,3 | 21,3 |
| | | 2 | 306,7 | 25,3 | 55,3 | 21,3 |
| 10 | E7018 | 1 | 295,4 | 25,3 | 53,6 | 20,8 |
| | | 2 | 281,9 | 25,3 | 53,6 | 20,8 |

Tabla 3.1 Datos de temperatura de la experimentación del proceso de soldadura SMAW

Fuente: (Propia)

| Placa | Electrodo | Posición | Espesor [m] | x [m] | y [m] | Voltaje [V] | Amperaje [A] | Tiempo de soldadura [s] |
|-------|-----------|----------|-------------|--------|--------|-------------|--------------|-------------------------|
| 1 | E6011 | 1 | 0,003 | -0,05 | 0,025 | 20,5 | 80 | 19,1 |
| | | 2 | 0,003 | -0,075 | -0,025 | 20,5 | 80 | 19,1 |
| 2 | E6011 | 1 | 0,003 | -0,05 | 0,025 | 23,4 | 90 | 19,8 |
| | | 2 | 0,003 | -0,025 | -0,025 | 23,4 | 90 | 19,8 |
| 3 | E6011 | 1 | 0,003 | -0,05 | 0,025 | 24 | 103 | 17,3 |
| | | 2 | 0,003 | -0,025 | -0,025 | 24 | 103 | 17,3 |
| 4 | E6013 | 1 | 0,003 | -0,05 | 0,025 | 23,5 | 103 | 24,6 |
| | | 2 | 0,003 | -0,075 | -0,025 | 23,5 | 103 | 24,6 |
| 5 | E6013 | 1 | 0,003 | -0,05 | 0,025 | 22,8 | 115 | 23,8 |
| | | 2 | 0,003 | -0,075 | -0,025 | 22,8 | 115 | 23,8 |
| 6 | E6013 | 1 | 0,005 | -0,05 | 0,025 | 24,1 | 123 | 21,3 |
| | | 2 | 0,005 | -0,075 | -0,025 | 24,1 | 123 | 21,3 |
| 7 | E6013 | 1 | 0,005 | -0,05 | 0,025 | 20,5 | 120 | 34,2 |
| | | 2 | 0,005 | -0,075 | -0,025 | 20,5 | 120 | 34,2 |
| 8 | E7018 | 1 | 0,005 | -0,05 | 0,025 | 23 | 116 | 37,6 |
| | | 2 | 0,005 | -0,075 | -0,025 | 23 | 116 | 37,6 |
| 9 | E7018 | 1 | 0,005 | -0,05 | 0,025 | 23 | 127 | 37,4 |
| | | 2 | 0,005 | -0,075 | -0,025 | 23 | 127 | 37,4 |
| 10 | E7018 | 1 | 0,005 | -0,05 | 0,025 | 23 | 135 | 36,6 |
| | | 2 | 0,005 | -0,075 | -0,025 | 23 | 135 | 36,6 |

Tabla 3.2 Datos de espesor, coordenadas, voltaje, amperaje y tiempo de soldadura del proceso de soldadura SMAW

Fuente: (Propia)

3.2 Datos calculados

En la tabla 3.3 se puede observar los resultados obtenidos después de haber realizado los cálculos previamente mencionados en la sección 2.4 del presente documento. En el anexo 1 se presenta un ejemplo de cálculo.

| Placa | Posición | Posición termopares [m] | Calor absorbido durante la soldadura "Q" [W] | Calor absorbido por el calorímetro "Qc" [W] | Error Q vs Qc [%] | Potencia suministrada por la máquina soldadora [W] | Eficiencia térmica del proceso SMAW [%] |
|-------|----------|-------------------------|--|---|-------------------|--|---|
| 1 | 1 | 0,056 | 1250,58 | 1079,00 | 15,902 | 1640 | 65,79 |
| | 2 | 0,079 | 665,48 | 1079,00 | 38,325 | 1640 | 65,79 |
| 2 | 1 | 0,056 | 1213,41 | 1418,31 | 14,447 | 2106 | 67,35 |
| | 2 | 0,035 | 927,62 | 1418,31 | 34,597 | 2106 | 67,35 |
| 3 | 1 | 0,056 | 1437,05 | 1741,09 | 17,463 | 2472 | 70,43 |
| | 2 | 0,035 | 959,48 | 1741,09 | 44,892 | 2472 | 70,43 |
| 4 | 1 | 0,056 | 1703,42 | 1850,45 | 7,945 | 2420,5 | 76,45 |
| | 2 | 0,079 | 1671,63 | 1850,45 | 9,663 | 2420,5 | 76,45 |
| 5 | 1 | 0,056 | 1842,52 | 2017,32 | 8,665 | 2622 | 76,94 |
| | 2 | 0,079 | 1748,29 | 2017,32 | 13,336 | 2622 | 76,94 |
| 6 | 1 | 0,056 | 1521,23 | 2317,89 | 34,370 | 2964,3 | 78,19 |
| | 2 | 0,079 | 1730,80 | 2317,89 | 25,328 | 2964,3 | 78,19 |
| 7 | 1 | 0,056 | 1613,80 | 1768,07 | 8,726 | 2460 | 71,87 |
| | 2 | 0,079 | 1679,44 | 1768,07 | 5,013 | 2460 | 71,87 |
| 8 | 1 | 0,056 | 1793,99 | 1963,56 | 8,636 | 2668 | 73,60 |
| | 2 | 0,079 | 1852,30 | 1963,56 | 5,667 | 2668 | 73,60 |
| 9 | 1 | 0,056 | 1864,02 | 2058,84 | 9,463 | 2921 | 70,48 |
| | 2 | 0,079 | 1922,70 | 2058,84 | 6,612 | 2921 | 70,48 |
| 10 | 1 | 0,056 | 1723,06 | 2029,59 | 15,103 | 3105 | 65,37 |
| | 2 | 0,079 | 1774,73 | 2029,59 | 12,557 | 3105 | 65,37 |

Tabla 3.3 Resultados del método de evaluación de la eficiencia del proceso de soldadura SMAW

Fuente: (Propia)

Se realiza una comparación entre el amperaje suministrado por la máquina soldadora y el resultado de la eficiencia para los diferentes espesores de placa, esto se puede apreciar en la figura 3.1

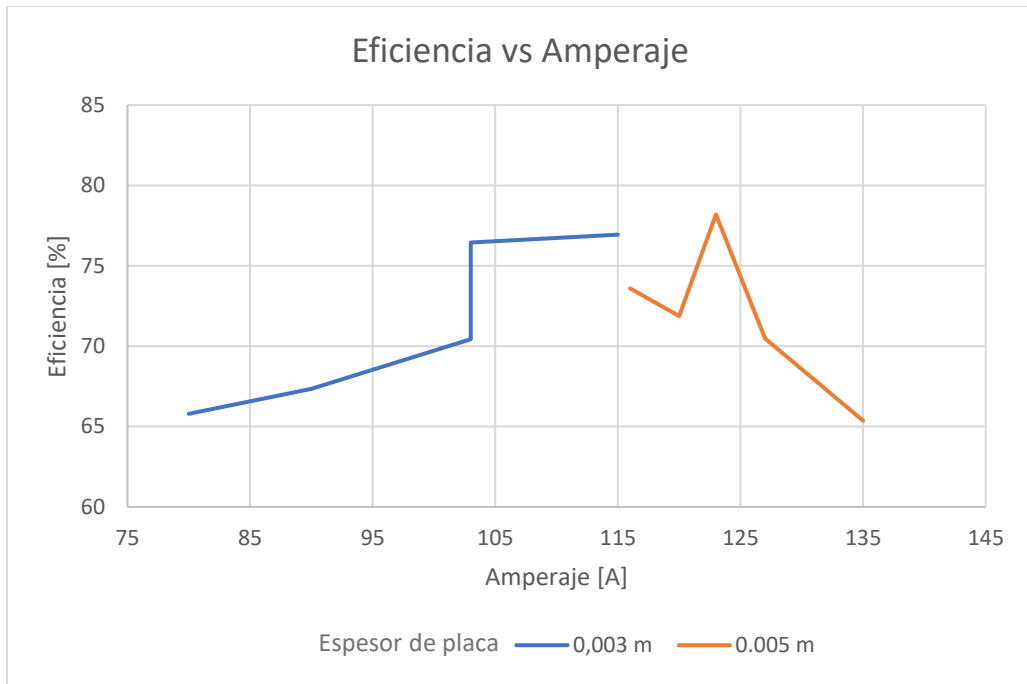


Fig. 3.1 Gráfica de eficiencia vs amperaje por espesor de placa

Fuente: (Propia)

En la figura 3.2 se realiza una comparación entre la eficiencia y el electrodo utilizado

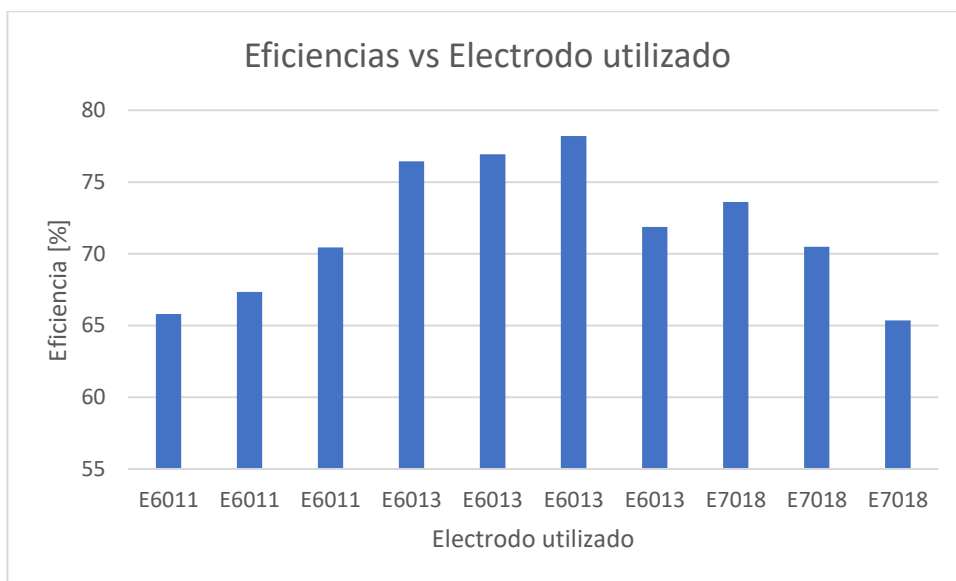


Fig. 3.2 Gráfica de eficiencia vs electrodo utilizado

Fuente: (Propia)

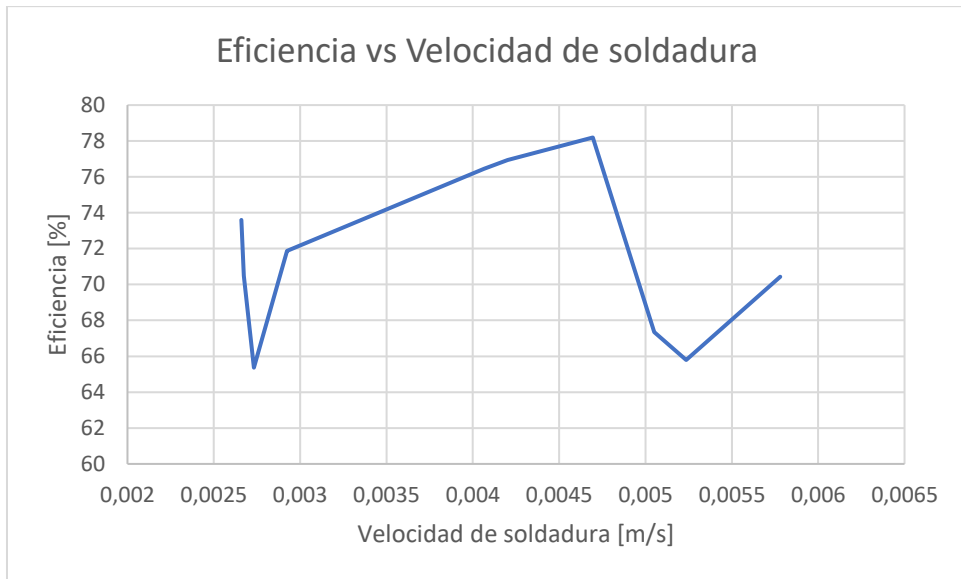


Fig. 3.3 Gráfica de eficiencia vs Velocidad de soldadura

Fuente: (Propia)

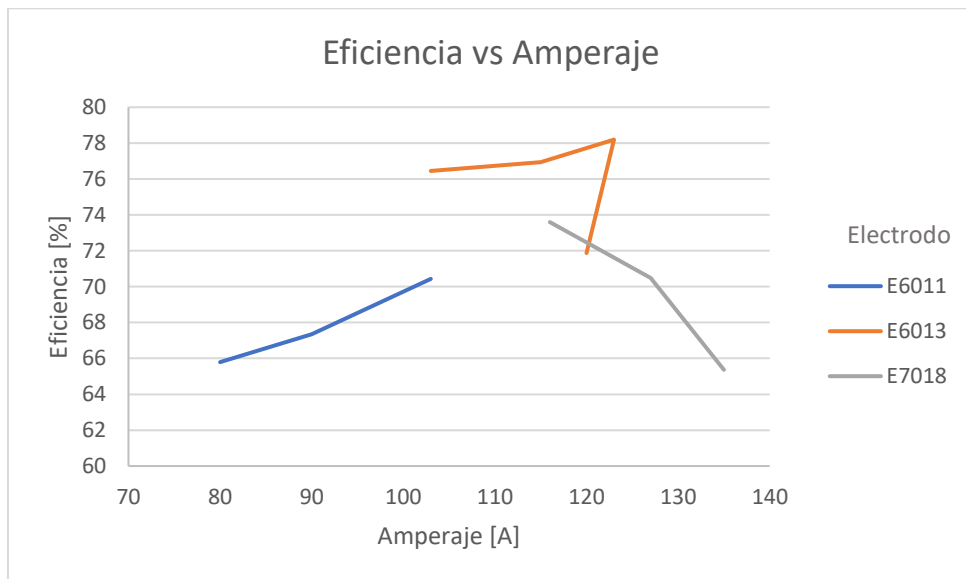


Fig. 3.4 Grafica de Eficiencia vs Amperaje por electrodo

Fuente: (Propia)

3.3 Discusión de resultados

Se puede observar mediante las tablas 3.2 y 3.3 que el tiempo de soldadura influye de gran manera en la pérdida de calor hacia el ambiente. La placa 9 y 10 tienen una velocidad de soldadura muy similar, la placa 10 fue soldada con un amperaje mayor pero presenta una menor absorción de calor y así mismo una menor eficiencia como se observa en la figura 3.3.

El error en la tabla 3.3 entre el calor absorbido durante la soldadura, es decir, el calculado con la ecuación y el del calorímetro en ciertas mediciones es muy grande alrededor del 40%, los errores más grandes se pueden observar en la placa de 3mm y en los puntos más cercanos a la fuente de soldadura especialmente en la placa 2 y 3 los cuales se colocaron en sentido contrario para observar cómo afecta la posición del termopar.

La comparación entre el calor absorbido por la placa calculado mediante el calorímetro y el calor absorbido por la placa calculado mediante la ecuación analítica durante la soldadura que presenta menor error son los de la placa 7 con un valor de 5% y 8%, siendo el valor de 8% el más cercano al punto final de la soldadura.

Al calcular la eficiencia con el calor medido en el calorímetro, se puede observar que se encuentra en el rango de 65% al 78%.

En la figura 3.1 se puede observar como al subir el amperaje, es decir, la potencia suministrada por la máquina soldadora, de igual manera sube la eficiencia en la placa con espesor de 3mm.

Se puede observar que a un mismo nivel de energía la eficiencia sube debido a que las placas fueron soldadas con diferente electrodo pero igual amperaje, es decir, que este electrodo trabaja mejor a ese nivel de potencia.

Se puede observar en la figura 3.1 que en la placa de 5mm al aumentar el amperaje no se muestra una tendencia de la eficiencia como en las placas de 3mm. Las placas de 5mm tienen un pico de eficiencia en 120 A y después empieza a disminuir esta placa fue soldada con un electrodo E6013.

El electrodo utilizado en la soldadura de cada placa influye en la eficiencia, como se puede observar en la figura 3.2 en donde el electrodo E6013 presenta los mayores valores de eficiencia térmica, seguido por el electrodo E7018 y presentando los valores de eficiencia más bajos se encuentra el electrodo E6011.

Analizando la figura 3.4, se observa que la eficiencia en cada electrodo y el electrodo E6013 presenta el mayor pico de eficiencia en toda la experimentación con un amperaje de 123 A, el electrodo E7018 presenta su mayor valor de eficiencia con un amperaje de 116 A y el electrodo E6011 presenta su mayor valor de eficiencia con un amperaje de 103 A.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.4 Conclusiones

La velocidad de soldadura al ser un factor que afecta drásticamente la eficiencia del proceso (figura 3.3) y la medición de la misma debe tener un mayor control, ya que, al tener una gran velocidad el cordón de soldadura puede no ser el deseado y al tener una velocidad muy baja se incurre a grandes pérdidas de calor lo que significa un proceso menos eficiente y una medición más compleja de la eficiencia.

El error entre el calor absorbido por la placa calculado mediante el calorímetro y el calor absorbido por la placa calculado mediante la ecuación analítica durante la soldadura se debe a varios factores como son la posición de los termopares, tiempo de reacción de los mismos, la fijación de los termopares a la placa, dimensiones de la placa. El mayor error obtenido durante la experimentación fue al momento de tener varios de estos factores actuando a la vez como lo fueron una fijación de los termopares alejada de la superficie de la placa debido a la sobre monta de la soldadura del clavo para la fijación del mismo; la medición en puntos muy cercanos al punto final de la fuente de calor de la soldadura ya que el termopar reacciona al calor que genera el electrodo en ese instante sin tener un valor de temperatura real en el punto de medición. Cuando las dimensiones de la placa son muy pequeñas el proceso no llega a ser estacionario por lo que las curvas de temperatura no llegan a formarse como en el modelo matemático propuesto.

Debido a que existen errores menores al 10% entre el calor absorbido por la placa calculado mediante el calorímetro y el calor absorbido por la placa calculado mediante la ecuación analítica durante la soldadura se puede validar la ecuación analítica del modelo matemático, por lo que la ecuación serviría para el cálculo de la eficiencia térmica siendo más minucioso en la toma de temperaturas de la placa, sin necesidad de un calorímetro. Los errores más grandes se puede asegurar que fueron causados por errores de medición y factores mencionados anteriormente. Otro factor que influye en este error son las limitaciones que existieron en la obtención de un calorímetro que sea de un proveedor de equipos ya certificado, debido a esto se diseñó y se construyó un calorímetro que puede tener más pérdidas que un calorímetro certificado.

Se concluye que la eficiencia térmica del proceso de soldadura SMAW se encuentra en el rango de 65% al 78% siendo el valor de 71,87% de la placa 7 el más cercano a un valor real, debido al bajo error presentado en la comparación de los dos

métodos para calcular la eficiencia y siendo el valor más aproximado al valor promedio del rango de eficiencias.

Se puede concluir que la eficiencia dependerá de muchos factores siendo unos de los más importantes la potencia y la velocidad de soldadura, se puede tener la máxima eficiencia determinando la potencia y velocidad de soldadura adecuados para el espesor de placa y el tipo de electrodo, por esta razón los fabricantes de electrodos suelen recomendar el amperaje para los mismos.

Según la figura 3.2 se puede llegar a la conclusión de que el valor de amperaje de 123 A es el óptimo para electrodos E6013 en placas de 5mm ya que produce el valor de eficiencia más alto para estos parámetros del proceso de soldadura SMAW.

Según la figura 3.2 se puede llegar a la conclusión de que el valor de amperaje de 116 A es el óptimo para electrodos E7018 en placas de 5mm ya que produce el valor de eficiencia más alto para estos parámetros del proceso de soldadura SMAW.

Según la figura 3.2 se puede llegar a la conclusión de que el valor de amperaje de 103 A es el óptimo para electrodos E6011 en placas de 3mm ya que produce el valor de eficiencia más alto para estos parámetros del proceso de soldadura SMAW. Según The Welding Institute la eficiencia puede llegar a ser hasta de un 80% (The Welding Institute, 2021) por lo que la eficiencia que se pudo obtener de la experimentación y de la ecuación se encuentra en un rango correcto de eficiencia.

3.5 Recomendaciones

Se recomienda que para la medición de temperaturas superficiales de la placa se debe realizar la fijación de los termopares de forma que estos se sitúen lo más cercanos posible al punto de medición en la superficie del material base. Si se utiliza el mismo método utilizado en la experimentación de esta tesis se debe procurar remover el exceso de material entre el clavo y el material base después de ser soldados a los puntos de medición con la intención antes mencionada.

Se recomienda no unir las puntas de los termopares ya que al ser un material metálico el que será medido causará errores de medición de la temperatura, por lo que se debe dejar una mínima distancia entre sus puntas.

Se recomienda para la experimentación utilizar placas de mayores dimensiones teniendo en cuenta que sea placa delgada, ya que el método matemático abarca este tipo de placas.

Se recomienda no medir temperaturas en puntos muy cercanos a la fuente de calor.

Se recomienda el uso de la ecuación del modelo matemático utilizado que es el de fuente lineal en movimiento en una placa delgada para la determinación de la eficiencia térmica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Welding Society. (2021). Glosario AWS. *SHIELDED METAL ARC WELDING*. American Welding Society. Recuperado el 11 de Febrero de 2021, de <https://awo.aws.org/glossary/shielded-metal-arc-welding-smaw/>
- Cengel, Y., & Boles, M. (2015). Termodinámica. 8. México, D. F.: McGRAW-HILL.
- Escuela de soldadores de Sevilla. (2020). Tipos de corriente y polaridad. Sevilla. Recuperado el 11 de Febrero de 2021, de <http://www.escueladesoldadores.com/como-soldar-con-tig-tutorial-parte-2/>
- García, V., Moreno-Piraján, J. C., & Giraldo, L. (2007). Construcción de un Calorímetro para la Determinación. Bogotá, Colombia: Grupo de Investigación en sólidos porosos y calorimetría. Departamento de Química. Facultad de Ciencias. Universidad de Los Andes.
- Godino, O., & Oliva, A. (2011). Física II.
- LINCOLN ELECTRIC. (s.f.). Fundamentos de Soldadura por Arco. México. Recuperado el 11 de Febrero de 2021, de <https://www.lincolnelectric.com/es-mx/support/process-and-theory/Pages/arc-welding-detail.aspx>
- López, M., Montenegro, B., & Estupiñan, P. (Noviembre de 2008). Estudio de las distorsiones producidas en vigas tipo I fabricadas por soldadura a filete con el proceso GMAW. *Proyecto previo a la obtencion del título de Ingeniero Mecánico*. Quito: Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.
- Millán, E., Gutiérrez, C., Vera, O., & Posada, J. (2016). Calorimetría: Equivalente térmico del calorímetro. Cali: Universidad Santiago de Cali. Facultad de Ciencias Básicas. Programa de Química. .
- OMEGA. (2020). Termopar. España. Recuperado el 24 de Febrero de 2021, de <https://es.omega.com/prodinfo/termopares.html>
- The Welding Institute. (2021). WHAT IS THE DIFFERENCE BETWEEN HEAT INPUT AND ARC ENERGY? Cambridge.

ANEXOS

Anexo 1: Ejemplo de cálculo

Cálculo del calor absorbido por el material base durante la soldadura

$$Q = \frac{(T - T_o) 2\delta\pi k}{\exp\left(-\frac{vx}{2\alpha}\right) K_o \left(r\sqrt{\left(\frac{v}{2\alpha}\right)^2 + \frac{b}{\alpha}}\right)}$$

Propiedades del material

$$k = 60,5 \left[\frac{W}{m K}\right]$$

$$\rho = 7850 \left[\frac{kg}{m^3}\right]$$

$$Cp = 460 \left[\frac{J}{kg K}\right]$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} = \frac{60,5}{7850 * 460} = 1,6754 * 10^{-5} \left[\frac{m^2}{s}\right]$$

Velocidad de soldadura

$$v = \frac{\text{longitud de cordón}}{\text{tiempo de soldadura}} = \frac{0,1}{19,1} = 0,0052356 \left[\frac{m}{s}\right]$$

Posición del termopar

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{-0,05^2 + 0,025^2} = 0,056 [m]$$

Cálculo de la constante "b"

El valor de " $hc+hr$ ", es decir, el coeficiente de convección radiación se toma de los autores López, M., Montenegro, B., & Estupiñan, P. el cual es de 70 [W/m²*K]

$$b = \frac{2(h_c + h_r)}{\rho C_p \delta} = \frac{2 * 70}{7850 * 460 * 0,003} = 0,012923 \left[\frac{1}{s}\right]$$

Calor absorbido

$$Q = \frac{(185,6 - 27,7)2 * 0,003 * \pi * 60,5}{\exp\left(-\frac{0,0052356 * -0,05}{2 * 1,6754 * 10^{-5}}\right) K_o \left(0,056 \sqrt{\left(\frac{0,0052356}{2 * 1,6754 * 10^{-5}}\right)^2 + \frac{0,012923}{1,6754 * 10^{-5}}}\right)}$$

$$Q = 1250,5849 [W]$$

Cálculo del calor absorbido por el calorímetro después de la soldadura

$$E_c = (m_{agua} + m_{eq}) * Cp_{agua} * \Delta T_{agua}$$

Donde:

$$m_{agua} = 0,5 \text{ [kg]}$$

$$Cp_{agua} = 4180 \left[\frac{J}{kg K} \right]$$

Masa equivalente en agua

$$m_{eq} = \frac{m_{cal} * Cp_{cal}}{Cp_{agua}}$$

Donde:

$$m_{cal} = 0,043798 \text{ [kg]}$$

$$Cp_{cal} = 460 \left[\frac{J}{kg K} \right]$$

$$m_{eq} = \frac{0,043798 * 460}{4180} = 0,043798$$

Energía absorbida por el calorímetro

$$E_c = (0,5 + 0,043798) * 4180 * (29,5 - 2,4) = 20608,99 \text{ [J]}$$

Calor absorbido por el calorímetro después de la soldadura

$$Q_c = \frac{E_c}{t_s} = \frac{20608,99}{19,1} = 1079,004628$$

Cálculo del error entre calor absorbido por la placa durante la soldadura y calor absorbido por el calorímetro después de la soldadura

$$e = \frac{Q - Q_c}{Q_c} * 100\% = \frac{1250,5849 - 1079,0046}{1079,0046} * 100\% = 15,9\%$$

Cálculo de la eficiencia térmica

$$\eta = \frac{Q_c}{Q_T} * 100\%$$

Donde

$$Q_T = I * V = 80 * 20,5 = 1640 \text{ [W]}$$

Entonces:

$$\eta = \frac{Q_c}{Q_T} * 100\% = \frac{1079,0046}{1640} * 100\% = 65,79\%$$