

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ESTUDIO DEL PROCESO DE SOLDADURA GTAW PARA ACEROS
INOXIDABLES Y ALUMINIO.**

**ELABORACIÓN DEL RÉGIMEN DE SOLDADURA EN
MATERIALES FERROSOS**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA
MECÁNICA, INGENIERÍA MECÁNICA**

DAYSI NOHEMÍ SANCHEZ MOPOSITA

daysi.sanchez01@epn.edu.ec

DIRECTOR: Ing. MARIO GERMAN GRANJA RAMÍREZ, MSc.

mario.granja@epn.edu.ec

DMQ, Febrero 2022

CERTIFICACIONES

Yo, Daysi Nohemí Sánchez Moposita declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



Daysi Nohemí Sánchez Moposita

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Daysi Nohemí Sánchez Moposita, bajo mi supervisión.



Ing. Mario Granja MSc.
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.



Daysi Nohemí Sánchez Moposita



Mario Germán Granja Ramírez

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación se lo dedico en primer lugar a Dios por haberme dado las fuerzas y perseverancia para continuar cada día de estudios y de esta forma culminar con esta etapa tan maravillosa de mi vida, a mis maravillosos padres César Sánchez y María Moposita quienes a través de sus sabias palabras de aliento y con su apoyo incondicional me guiaron y motivaron para seguir.

A mi eterna abuelita Mercedes Chango quien en vida siempre me acompañó y guio con sus hermosas palabras, así como su valiosa compañía, fue y es mi pilar fundamental para formarme como una gran profesional.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por otorgarme la suficiente inteligencia, paciencia y constancia para continuar en cada momento y de esta forma lograr desarrollarme académicamente.

A mis padres y mis hermanos quienes fueron el motor que siempre me impulsaron a seguir, que, con cada palabra, consejo y apoyo me inspiraron para continuar con esta extraordinaria travesía y llegar hasta el final de esta grandiosa etapa.

Al Ing. Mario Granja MSc. el cual depositó toda su confianza en nosotros para el desarrollo del presente trabajo, quien, con su apoyo incondicional, con su guía y asesoramiento para finalizar con éxitos el trabajo de integración curricular.

A mi querida facultad de ingeniería mecánica por cada instante de pasiones vividas, facultad que me permitió estudiar y finalizar mis estudios.

A mis amigos los LARK FC y CHIRIFITIS con los cuales compartí grandes momentos, quienes me acompañaron a lo largo esta grandiosa etapa universitaria, mis amigos con los cuales pasamos momentos estresantes, de alegría, de pasión y de amor a la roja y negra querida, quienes con su amistad hicieron que cada momento vivido sea mejor.

A esa personita que con su inteligencia, seriedad infinita y dedicación se robó mi admiración y corazón, la cual cada día me incita a seguir con mi formación profesional y llegar lejos hasta conseguir nuevas experiencias, Esteban.

Tabla de contenido

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
RESUMEN	VIII
ABSTRACT	IX
1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO	10
1.1 Objetivo general	11
1.2 Objetivos específicos	11
1.3 Alcance	11
1.4 Marco teórico	12
1.4.1 Principios de la soldadura GTAW	12
1.4.1.1 Historia del desarrollo del proceso	13
1.4.1.2 Requerimientos de equipos	13
1.4.1.3 Aplicabilidad	15
1.4.1.4 Ventajas y desventajas	16
1.4.1.5 Principios de operación	17
1.4.2 Gases de protección	19
1.4.3 Electrodo	22
1.4.3.1 Material del electrodo	22
1.4.3.2 Tamaño del electrodo y forma de punta	24
1.4.3.3 Porta mordazas y boquillas de gas	28
1.4.3.4 Polaridad	29
1.4.4 Características de las fuentes de poder	30
1.4.5 Antorchas	33
1.4.6 Acción de Rectificación y Limpieza en AC	36
1.4.7 Alimentadores de Alambre de Aporte	37
1.4.8 Soldadura de metales ferrosos	38
1.4.8.1. Soldabilidad de Aceros al carbono	39
1.4.8.1.1. Aceros de alto contenido de carbono	39
1.4.8.1.2. Aceros de medio contenido de carbono	40
1.4.8.1.3. Aceros de bajo contenido de carbono	40
1.4.8.2. Aceros aleados	40
1.4.8.2.1. Aceros de baja aleación	40
1.4.9 Soldadura en Aceros inoxidables	41
1.4.9.1 Soldabilidad de los aceros inoxidables austeníticos	41
1.4.9.2 Soldabilidad de los aceros inoxidables ferríticos	42

1.4.9.3 Soldabilidad de los aceros inoxidable martensíticos	42
1.4.9.4 Soldabilidad de los aceros inoxidable endurecidos por precipitación (PH)	42
1.4.9.5 Soldabilidad de aceros inoxidable dúplex	43
1.4.10 Diagrama de fases	43
2. METODOLOGÍA	46
2.1 Análisis de los parámetros de operación más relevantes del proceso GTAW.	46
2.1.1 Establecimiento de los parámetros de soldadura	46
2.1.2 Composición del Electrodo y Forma de la Punta	46
2.1.3 Gas de Protección y Caudal de Flujo	47
2.2 Preparación para la Soldadura	47
2.2.1 Diseño de la Junta	47
2.2.1.1 Juntas a Tope	48
2.2.1.2 Juntas Traslapadas	50
2.2.1.3 Juntas en Esquina	50
2.2.1.4 Juntas en T	51
2.2.1.5 Junta de Reborde	52
2.3 Manejo de la Antorcha y Adición del Metal de Aporte	52
2.4 Comparación del gas de protección	54
2.5 Descripción de la soldadura manual	55
2.5.1 Técnicas en la soldadura manual	55
2.5.2 Métodos para Arrancar el Arco	55
2.5.3 Gas de Respaldo, Remolque Protector y Cámaras de Atmósfera	56
2.6 Descripción de la soldadura automática	59
2.6.1 Técnicas en la soldadura automática	59
2.6.1.1 Soldadura a Máquina Básica	59
2.6.1.2 Establecimiento de Parámetros en la Soldadura Automática.	59
2.6.1.3 Control de Velocidad de Avance	60
2.6.1.4 Control de Velocidad de Alimentación de Alambre	61
2.6.1.5 Control de Voltaje de Arco (Longitud de Arco)	62
2.6.1.6 Programadores de Soldadura	63
2.6.1.7 Corriente Pulsante, Alimentación de Alambre Pulsante	64
2.6.1.8 Instalación, Protección de Respaldo	66
2.6.1.9 Protección Auxiliar	66
3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	68
3.1 Resultados	68
3.2. Aceros comunes al Carbono	68
3.2.1. Aceros de bajo carbono	69
3.2.3. Aceros de medio contenido	70

3.2.3. Aceros de alto contenido de carbono	71
3.3. Aceros de Baja Aleación	72
3.4. Aceros inoxidables	75
3.4.1. Aceros inoxidables austeníticos.	75
3.4.2. Aceros inoxidables ferríticos	78
3.4.3. Aceros inoxidables martensíticos.	79
3.4.4. Aceros inoxidables dúplex	81
3.4.5. Aceros inoxidables endurecibles por precipitación	82
Conclusiones	87
Recomendaciones	88
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es establecer una guía apropiada de los parámetros eléctricos y funcionales para la aplicación de la soldadura por arco eléctrico con electrodo de tungsteno y protección gaseosa, el cual se lleva a cabo por medio del desarrollo de una metodología descriptiva, la misma que facilite la adecuada obtención de estos parámetros, que influyen en las propiedades mecánicas de los materiales, así como en la calidad del cordón de soldadura. El presente trabajo de investigación muestra el estudio del proceso GTAW aplicado en aceros al carbono, aceros inoxidables y sus aleaciones ferrosas, esta información se la lleva a cabo través de recopilación de información relevante, en donde se estructura de forma ordenada y precisa describiendo cada uno de los parámetros de la soldadura (GTAW). A la vez se describe el correcto uso y parámetros operativos, todo esto dependiendo de los factores como el manejo de la antorcha, diseño de juntas, elección del electrodo en donde se ve envuelto la potencia suministrada a través de la máquina soldadora, velocidad de soldadura, así como la forma de la punta de este al ser aplicado en los materiales de estudio

Debido a la diferente microestructura que poseen los materiales a estudiar, los parámetros de operación son especificados de forma individual, la misma que contienen información operativa según el material, amperaje, voltaje del arco, caudal, etc., parámetros principales para llevar a cabo en soldadura manual y automática en el proceso de soldadura GTAW. Toda la información es juntada y estructurada de forma ordenada en tablas, en las cuales se puede distinguir los distintos parámetros operativos de los materiales ya descritos, siendo este el principal objetivo de este estudio, de tal forma que se llegase a la obtención de uniones limpias y con excelentes propiedades mecánicas.

PALABRAS CLAVE: Estudio, tablas, GTAW, aceros al carbono, aceros inoxidables, aleaciones ferrosas.

ABSTRACT

The objective of the present work is to establish an appropriate guide of the electrical and functional parameters for the application of electric arc welding with a tungsten electrode and gas protection, which is carried out through the development of a descriptive methodology, the same that facilitates the adequate obtaining of these parameters, which influence the mechanical properties of the materials, as well as the quality of the welding bead. The present research work shows the study of the GTAW process applied in carbon steels, stainless steels and their ferrous alloys, this information is carried out through the collection of relevant information, where it is structured in an orderly and precise way describing each one. of welding parameters (GTAW). At the same time, the correct use and operating parameters are described, all depending on factors such as torch handling, joint design, choice of electrode where the power supplied through the welding machine is involved, welding speed., as well as the shape of its tip when applied to study materials

Due to the different microstructure of the materials to be studied, the operating parameters are specified individually, the same ones that contain operating information according to the material, amperage, arc voltage, flow rate, etc., main parameters to carry out in manual and automatic welding in the GTAW welding process. All the information is gathered and structured in an orderly manner in tables, in which the different operating parameters of the materials already described can be distinguished, this being the main objective of this study, in such a way that clean joints are obtained. and with excellent mechanical properties.

Key words: Study, tables, GTAW, carbon steels, stainless steels, ferrous alloy

1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

En el presente trabajo de investigación se describe de forma organizada los diferentes parámetros de operación aplicados en el proceso de soldadura GTAW en aceros al carbono, aceros inoxidables y sus aleaciones ferrosas, a continuación, se detalla de forma estructurada el desarrollo de componente:

En el capítulo uno se realiza una profunda investigación en donde se habla de la historia del proceso de soldadura GTAW, se puntualiza los principios de operación, especificando los requerimientos, aplicabilidad, ventajas y desventajas, así como los principios de operación. Para después pasar a la descripción de los gases que son usados en el proceso aclarando cada una de las propiedades que estos poseen al ser aplicados en los materiales como aceros, aceros inoxidables y sus aleaciones ferrosas, de igual forma se determina el tipo de electrodo a utilizar en estos materiales, centrándose en el tipo de material, polaridad y el tamaño y forma de la punta. De la misma forma se detalla las características de la fuente de poder, antorcha, acción de rectificación y limpieza en AC, al igual que los alimentadores de alambre de aporte. Para después pasar a la descripción de los materiales a estudiar como son los aceros al carbono, aceros inoxidables y sus aleaciones ferrosas.

En el capítulo tres se realiza un análisis profundo de los diferentes parámetros de operación del proceso GTAW, en donde especifica la correcta aplicación y selección del material de aporte, electrodos, gas de protección y caudal de flujo, diseño de las diferentes juntas, uso del proceso GTAW, técnicas óptimas al emplear al proceso de forma manual o automática.

En el capítulo final se realiza el análisis de resultados del estudio del proceso GTAW detallando los parámetros operativos de cada uno de los materiales de estudio, así como la elaboración de tablas en las cuales se detalla la selección de estos parámetros al momento de trabajar con el proceso de soldadura GTAW tanto en acero al carbono como en aceros inoxidables y sus aleaciones ferrosas.

1.1 Objetivo general

Estudiar el proceso de soldadura GTAW para materiales ferrosos.

1.2 Objetivos específicos

- Recopilar información sobre el proceso de soldadura GTAW.
- Determinar los factores y variables más relevantes de la soldadura GTAW.
- Organizar la información de manera estructurada con los factores y parámetros involucrados en el proceso GTAW.
- Analizar los parámetros del proceso GTAW para la soldadura de materiales ferrosos, aceros al carbono y aceros inoxidables.
- Elaborar tablas con los parámetros recomendados para soldar materiales ferrosos, aceros al carbono y aceros inoxidables.

1.3 Alcance

El estudio está dirigido al proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo de tungsteno y protección gaseosa GTAW, en donde se recopila información de cada uno de los parámetros de operación más relevantes del proceso, esta información es estructurada para cada uno de los materiales de estudio, es organizada y plasmada a través de tablas, las mismas detallan los parámetros óptimos de trabajo para la aplicación de proceso de soldeo, en materiales como aceros al carbono, aleados, aceros inoxidables y aleaciones ferrosas.

En presente trabajo de titulación se describe la influencia de cada uno de estos parámetros durante la aplicación del proceso de soldadura GTAW, parámetros que contienen información a detalle para la correcta aplicación de estos, en donde el trabajo se enfoca en el tipo de material de aporte, diseño de juntas, tipo de corriente, voltaje, uso de electrodos para los materiales de estudio, manejo adecuado de la antorcha, gas de protección, etc. Los resultados obtenidos de este estudio e investigación son plasmados en tablas para una mejor comprensión del proceso de soldadura.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Principios de la soldadura GTAW

El proceso de soldadura por arco con electrodo de tungsteno (GTAW), el cual también es conocido como el proceso TIG (Tungsten Inert Gas), es un proceso derivado del arco eléctrico pero el calor es establecido entre un electrodo de tungsteno y el elemento a ser soldado, como se puede ver en la figura 1.1. La zona del arco es rellenada con un gas inerte como medio de protección entre el electrodo de tungsteno y la pieza de metal, esto evita la oxidación y provee una trayectoria conductiva para el paso de la corriente. [1]

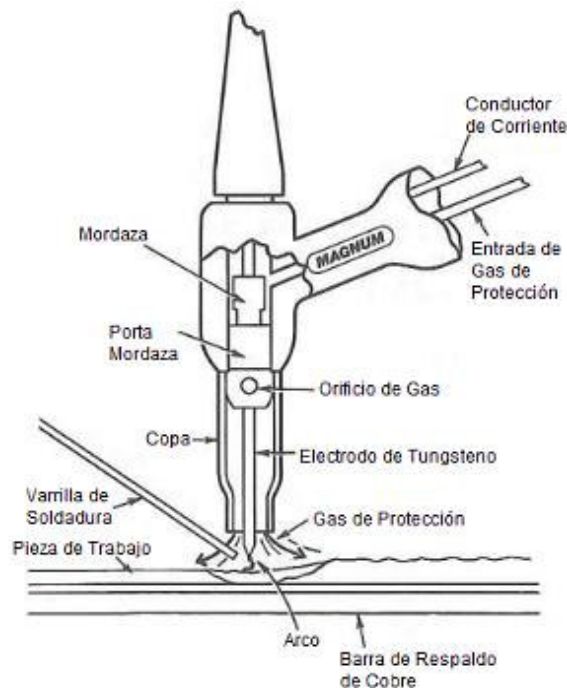


Figura 1.1. Soldadura por arco con electrodo de Tungsteno bajo protección gaseosa.

En la actualidad el proceso GTAW ha sido muy desarrollado por lo que es capaz de soldar la mayoría de los metales y aleaciones. Se puede soldar sin material de aporte y en caso de requerir añadir el metal de aporte este dependerá del tamaño y la forma de la junta. A pesar de que la tasa de deposición del material de aporte es independiente de la energía del arco (Voltaje vs. Corriente), esta energía limitada a la tasa de deposición. [1]

En este proceso se puede soldar en un amplio rango a los metales, desde láminas de 0.005" de espesor a 2 o 3 amperios hasta placas de 1" a 1000 amperios con una pasada. [2]

1.4.1.1 Historia del desarrollo del proceso

Los primeros en soldar con un arco eléctrico entre un electrodo de tungsteno no consumible y una pieza de trabajo (metal base) en un espacio lleno con gas inerte como el argón y el

helio, fueron H. Hobart y P. Devers. Obtuvieron una patente por este nuevo proceso en 1926; sin embargo, este proceso no fue adaptado comercialmente principalmente porque los costos de los gases inertes eran muy elevados. [3]

El proceso GTAW fue perfeccionado por Russel Meredith en colaboración con V. Pavlecka en 1941, quienes también desarrollaron la primera antorcha para sostener al electrodo de tungsteno y entregar un gas inerte por medio de una boquilla que rodeaba al electrodo [3], proporcionando un medio de protección al arco de soldadura es decir a la pileta de soldadura, al electrodo y al metal a soldar.

En 1942, se emitió una patente a Meredith y el proceso desde ese entonces es conocido como soldadura "Heliarc". Aunque en un inicio el proceso se desarrolló utilizando helio, el argón pronto lo reemplazaría siendo el gas de protección más utilizado debido a su bajo costo y la obtención de un arco más estable. [3]

El desarrollo de este proceso que tiempo después sería conocido como GTAW fue con el objetivo de poder realizar la soldadura de materiales como las aleaciones de aluminio y magnesio en la aeronáutica. El primer desarrollo para soldar aleaciones de magnesio fue realizado con DCEP (polaridad inversa) debido a que proporciona una alta acción de limpieza necesaria en la superficie para este material requiriendo utilizar fuentes de poder en DC tipo moto-generador, sin embargo, la mayor parte del calor se presentaba en el electrodo de tungsteno. Con el desarrollo de la corriente AC en las fuentes se pudo usar los pulsos de la corriente para proporcionar esta acción de limpieza con generar un alto calor en el metal base para la soldadura. [3]

1.4.1.2 Requerimientos de equipos

El proceso GTAW al trabajar con altas corrientes se requiere de una antorcha refrigerada por gas o agua para sostener el electrodo de tungsteno el cual está conectado a la fuente de poder a través del cable de alimentación. En refrigeración con gas se trabaja con corrientes bajas, donde el cable de alimentación se encuentra dentro de la manguera de gas, el cual proporciona un adecuado aislamiento para el conductor [4], como se indica en la figura 1.2.

El proceso GTAW puede ser utilizado para realizar pases de raíz en tuberías con anillos de inserción consumible o con adición de metal. El resto de la ranura de la tubería puede ser soldada con el proceso SMAW o ya sea con procesos semiautomáticos como el GMAW (electrodo sólido) o FCAW (electrodo con el núcleo de flujo).

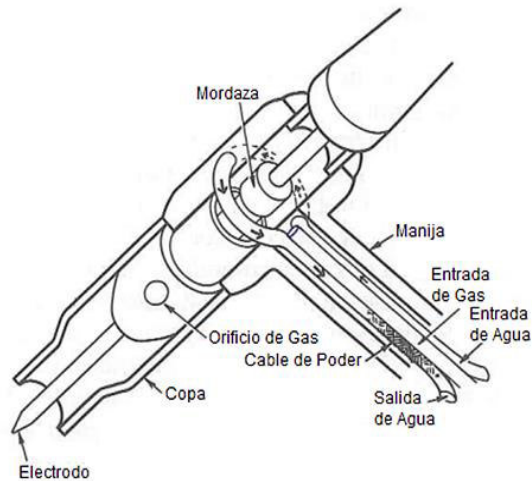


Figura 1.2. Antorcha GTAW enfriada con gas.

Las antorchas refrigeradas con agua, representadas en la figura 1.3, requieren de tres mangueras, siendo la primera para el suministro de agua, la segunda para el retorno del agua y la tercera para el suministro del gas. El cable de alimentación generalmente se encuentra en la manguera de retorno de agua, siendo enfriado con agua permitiendo el uso de un conductor más pequeño a comparación que el utilizado en la antorcha refrigerada por gas [4], al trabajar ambos a la misma corriente.

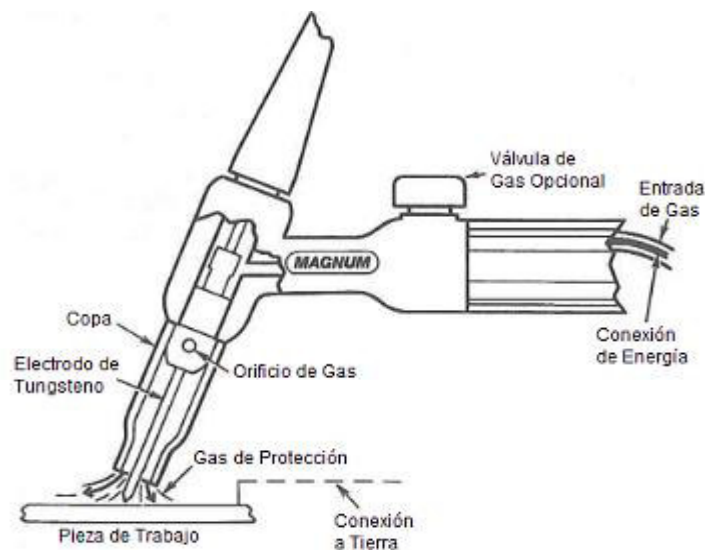


Figura 1.3. Antorcha GTAW enfriada con agua.

1.4.1.3 Aplicabilidad

El proceso GTAW produce soldaduras limpias y de una muy buena calidad, en la mayoría de los metales y aleaciones. Este es un proceso lento a comparación del resto de procesos, no se usaría al momento de requerir soldar metales que necesitan una alta tasa de deposición.

En GTAW a través de la fuente de alimentación se puede trabajar con corriente constante (DC) o alterna (AC), las cuales pueden o no requerir capacidades de pulsación. En el caso

del sistema de refrigeración por agua, la antorcha refrigerada por agua prefiere un circulador enfriador de agua sobre el uso de agua del grifo [4].

En el proceso GTAW automático o semiautomático, requiere de un equipo extra que permita el movimiento mecánico de la antorcha en relación con la pieza de trabajo, así como la alimentación del cable en la pileta de soldadura. Para un sistema completamente automático se requiere un programador, microprocesador, el cual controla: la corriente de soldadura, velocidad de desplazamiento y velocidad de alimentación del alambre de aporte. [5]

La soldadura puede requerir de un suministro de un gas inerte que generalmente es argón, helio o una mezcla de estos. El gas o gases pueden ser suministrados desde cilindros o recipientes líquidos, requiriendo de un regulador de presión y un flujómetro [5]. En la figura 1.4 se representa un diagrama esquemático de la configuración completa de la soldadura GTAW.

El proceso GTAW es aplicado en aquellas aleaciones donde existan zonas críticas de contaminación atmosférica. Entre estos materiales tenemos: materiales reactivos y refractarios como el titanio, zirconio y columbio, en donde una mínima cantidad de oxígeno o hidrógeno puede causar la pérdida de ductilidad y resistencia a la corrosión. [5]

Soldaduras que requieran una alta calidad, así como evitar la porosidad y fisuramiento, son las superaleaciones de base níquel. También es un proceso adecuado para soldar láminas de espesores delgados de todos los metales soldables debido a que puede controlar amperajes muy bajos (2 a 5 amperios), los cuales son requeridos para este tipo de láminas.

De un estudio reciente del proceso GTAW indica que, para soldar placas pesadas, de un

espesor de 1 a 1½" (25 a 38 mm), se realiza por arco sumergido o arco de tungsteno sumergido. Este proceso consiste en colocar en una máquina una antorcha refrigerada por agua con un electrodo de hasta 1/2" (13 mm) de diámetro de modo que la punta esté debajo de la superficie superior de la placa que está siendo soldada [6].

La fuerza proporcionada de una corriente de aproximadamente 1000 amperios empuja el metal fundido lejos y detrás del electrodo a medida que avanza la soldadura. Completar una soldadura se puede lograr en dos pasadas con poca o ninguna adición de metal de aporte.

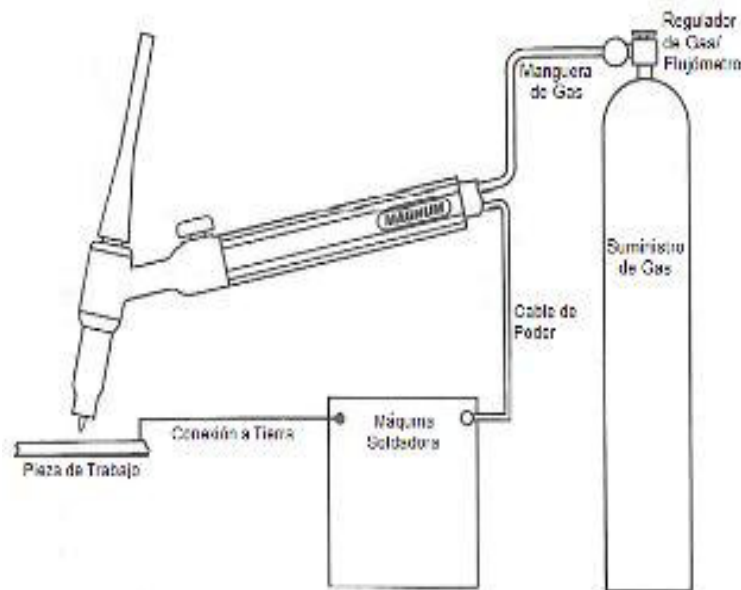


Figura 1.4. Configuración completa de la soldadura GTAW. [5]

1.4.1.4 Ventajas y desventajas

Como se mencionó previamente este proceso tiene como ventaja principal que las soldaduras obtenidas son de alta calidad en todos los metales y aleaciones soldables. Esta característica se debe a que el gas inerte protege al metal fundido de la contaminación cubriendo el arco y la zona de soldadura. Una excepción son las aleaciones de muy baja fusión las cuales no presentan esta ventaja por la dificultad de controlar el arco. También, se tiene como ventaja que se puede agregar el material de aporte a la piletta de soldadura independientemente de la corriente del arco, en comparación a otros procesos de soldadura por arco donde la tasa de deposición está relacionada con la corriente del arco [7]. Entre otras ventajas se puede mencionar que presentan muy bajas salpicaduras, son capaces de soldar materiales muy delgados y se adaptan a una variedad de aplicaciones automáticas y semiautomáticas.

Una desventaja de este proceso es la baja tasa de deposición de metal de aporte y que se

requiere una mayor habilidad del operador, por tanto, siendo este proceso de soldadura generalmente más costoso que otros. [7]

1.4.1.5 Principios de operación

En el proceso GTAW, el arco eléctrico se establece entre el electrodo de tungsteno y el metal base que será soldado, el cual, está rodeado por una atmósfera de gas inerte. El calor desarrollado en el arco, producto de la corriente y del voltaje, es generado en el terminal positivo (ánodo) siendo aproximadamente el 70% del calor del arco. [8]

En la figura 1.5 se indica como la corriente del arco se transporta primariamente por los electrones, los cuales son emitidos por la terminal negativa caliente (cátodo) y obtenida por la ionización de los átomos de gas.

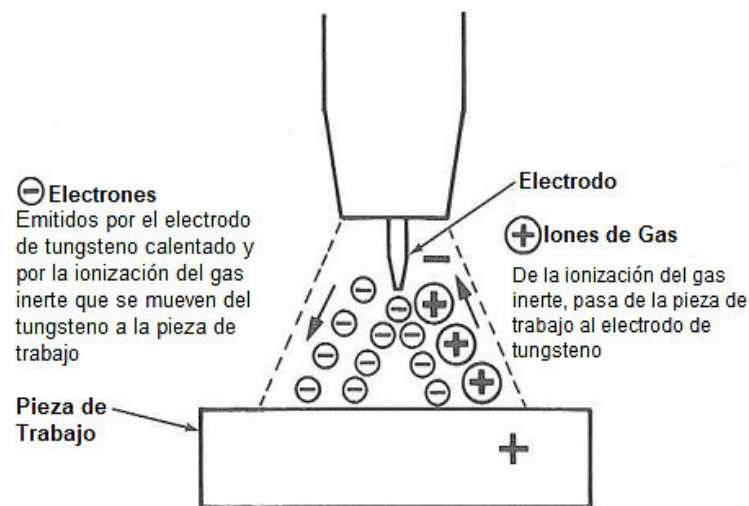


Figura 1.5. Corriente del arco DCEN, flujo de electrones.

Los electrones son atraídos por el ánodo, generando el 70% del calor del arco y una porción muy pequeña de corriente es transportada por iones de gas positivos atraídos hacia el cátodo, generando aproximadamente el 30% del calor del arco [1]; en la figura 1.6 se muestra como varían las características de los electrodos según el tipo de corriente usado. Cuando los electrones emitidos entran o interactúan con el ánodo, el cátodo pierde calor, por esta razón es que se desarrolla una mayor cantidad de calor en el ánodo que en el cátodo. [8]

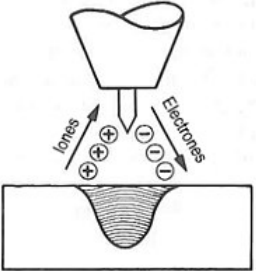
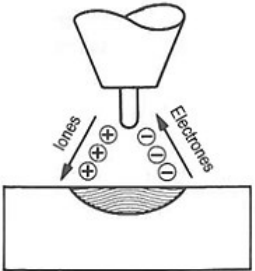
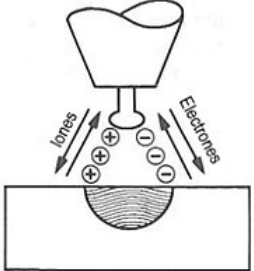



Tipo de corriente	DCEN	DCEP	AC (balanceado)
Polaridad del electrodo	Negativo	Positivo	
Flujo de Electrodo e Iones			
Características de Penetración			
Acción limpiadora de óxido	No	Si	Si - Una vez cada medio ciclo
Balace de calor en el arco (aprox.)	70% Pieza 30% Electrodo	30% Pieza 70% Electrodo	50% Pieza 50% Electrodo
Penetración	Profunda; estrecha	Poco profunda; ancha	Media
Capacidad del electrodo	Excelente e.g., 318 mm (1/8 pulg.) - 400 A	Pobre e.g., 6.35 mm (1/4 pulg.) - 120 A	Buena e.g., 3.18 mm (1/8 pulg.) - 225 A

Figura 1.6. Comportamiento de los iones y electrones según el tipo de corriente.

El voltaje a través del arco está formado por tres componentes: el voltaje del cátodo, el voltaje de la columna del arco y el voltaje del ánodo. El voltaje total del arco, en general, aumenta con la longitud del arco como se observa en la figura 1.7, no obstante, la corriente y el gas de protección también tienen efectos en el voltaje. El voltaje total se puede medir fácilmente, pero no se ha tenido éxito al tratar de medir los voltajes del cátodo y ánodo con precisión [9]. En la curva presentada se puede llegar a obtener un valor aproximado al voltaje total, que es igual a la suma del voltaje del cátodo y el ánodo, si se extrapola a la longitud del arco a cero. De esta manera, en el cátodo de tungsteno usando argón a 200 y 300 amperios, se tiene un voltaje total entre 7 y 10 voltios respectivamente.

En este proceso se prefiere que el calor sea en mayor cantidad en el metal base, el cual debe ser el ánodo, operando comúnmente en modo DCEN (polaridad negativa) donde el electrodo de tungsteno es el cátodo; entregando el calor donde se necesita más es decir en la pieza a soldar. La ionización del gas inerte, entrega calor de la pieza de trabajo al electrodo de tungsteno.

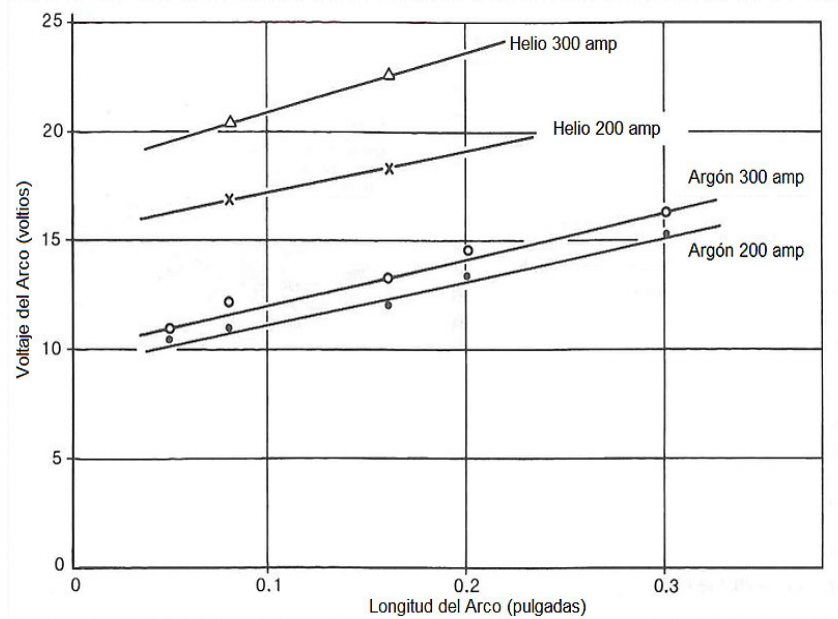


Figura 1.7. Voltaje de Arco vs. Longitud de Arco. [9]

1.4.2 Gases de protección

El proceso GTAW nos permite usar cualquier gas inerte para soldadura. En la figura 1.8 se puede apreciar la curva característica de voltaje-longitud de arco donde se compara su comportamiento para cinco gases inertes en corrientes de 300 amperios con un electrodo de tungsteno como cátodo y una pieza de titanio como ánodo [10]. La curva característica voltaje-corriente de arco se muestra en la figura 1.9, para las mismas condiciones de trabajo.

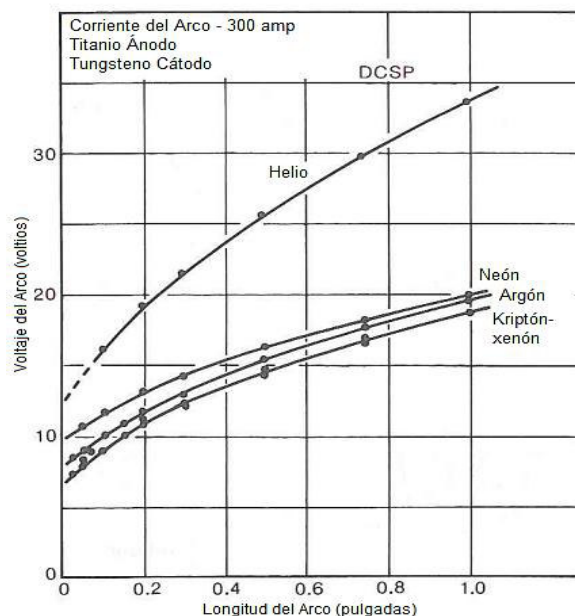


Figura 1.8. Voltaje de arco vs. longitud de arco para diferentes gases de protección. [10]

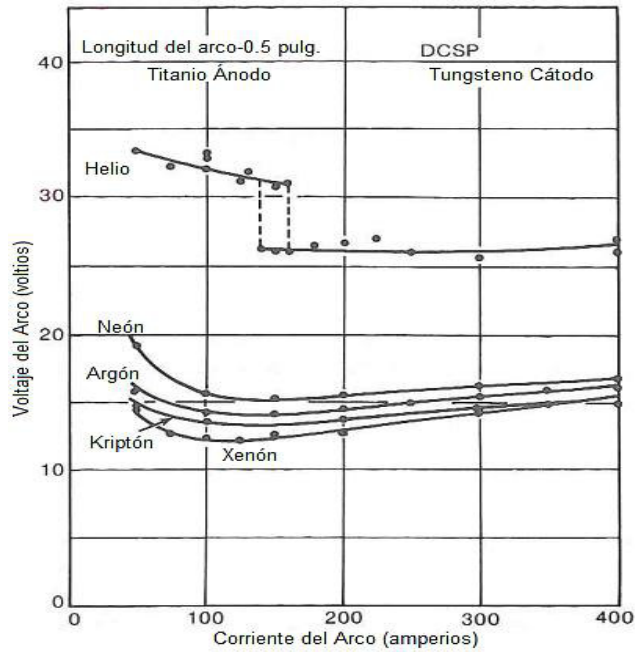


Figura 1.9. Voltaje vs. Corriente de arco para cinco gases inertes. [10]

El comportamiento de los gases es similar, pero el helio presenta curvas con un voltaje mucho más alto que el resto de los gases. Como resultado de estas comparaciones sólo el argón y el helio son comercialmente usados porque tienen características satisfactorias en las soldaduras y son más abundantes y mucho menos costosos que los otros gases inertes. Las características físicas y costos para los gases inertes están listados en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Propiedades y Costos aproximados de los Gases Inertes. [10]

Gas	Peso Atómico	Densidad Porcent. de aire	Porcent. de Atmósfera	Costo Aprox. \$/pies ³	Costo ⁽¹⁾ \$/h
Argón	40	130	0.934	0.043 (Cilindro de 45 gal. Liq.) 0.03 (Bulk Liq.)	1.39 0.90
Helio	4	13	0.00052 De Gas Natural	0.123 (Cilindro)	9.22
Neón	20	65	0.00182	4.00	120.00
Kriptón	84	273	0.000114	20.00	600.00
Xenón	131	425	0.000005	250.00	7500.00

(1) Valores basado en un caudal de 30 pies³/h para todos los gases excepto el helio que está basado con un caudal de 75 pies³/h.

El argón usado para soldadura es refinado a purezas mayores que 99.99%. Este constituye aproximadamente el 1% de la atmósfera de la tierra, la cual provee una ilimitada fuente de gas a través de la licuefacción y separación desde el aire. El helio es transportado en grandes camiones aislados a $-184\text{ }^{\circ}\text{C}$ y pueden ser suministrados al usuario final como líquido o gas comprimido en cilindros [5]. Si se requiere grandes volúmenes, el argón líquido puede ser suministrado a un costo significativamente más bajo que el gas argón. Sin embargo, se debe instalar un equipo para almacenar el argón líquido, vaporizarlo y distribuirlo en las áreas a usar. Se utilizan también contenedores portátiles de líquidos de 45 galones, ubicados en zonas donde el gas es utilizado y no requieren de un tanque de almacenamiento y un sistema de distribución [5]. El argón es usado en mayor medida que el helio por las siguientes razones [6]:

1. Este produce un arco más suave y estable.
2. Opera con voltaje de arco más bajo a cualquier corriente y longitud de arco.
3. Tiene una mayor acción de limpieza en la soldadura de materiales como aluminio y magnesio en AC.
4. El argón es más abundante, por tanto, se encuentra en mayor disponibilidad y a un bajo costo.
5. Usando caudales bajos se obtienen buenas protecciones.
6. Es más resistente a la contaminación en el arco por corrientes de aire.
7. Fácil arranque del arco.

La característica de voltaje de arco bajo del argón hace más fácil el arranque del arco y siendo más sencillo la soldadura manual de láminas delgadas donde el bajo calor del arco evita una excesiva fusión. Un bajo calor en las soldaduras verticales y sobrecabeza reduce la tendencia del metal a deslizarse. [5]

Como se mostró en las características de los gases, el argón tiene una densidad cercana a un 1.3 la de aire y 10 veces respecto al helio [3]. Esto permite al argón, al ser más pesado, cubrir completamente el área de soldadura de soldadura. Por el contrario, el helio al ser más liviano tenderá a subir rápidamente generando turbulencia y causando que el aire entre dentro de la atmósfera del arco contaminándolo [10]. El costo del helio es unas 3 veces el costo del argón, y el caudal requerido de helio en una soldadura puede ser de dos a tres veces que la del argón, por esta razón el helio puede alcanzar a costar nueve veces más que el argón. [3]

El helio se encuentra en segundo lugar en poder encontrarlo en bastante abundancia. Sin embargo, el calor desarrollado en un arco de helio es alrededor de 1.7 veces mayor en un arco de argón a una cierta corriente. La soldadura realizada con helio produce una penetración más profunda que la obtenida por argón. El helio, como se mencionó

anteriormente, es preferido para la soldadura de materiales gruesos y materiales de alta conductividad térmica tales como el cobre y el aluminio. [5]

El helio y las mezclas de argón-helio son preferidas para soldadura de secciones gruesas y para materiales que tienen alta conductividad térmica o altas temperaturas de fusión por el calor disponible a una cierta corriente de arco. Las mezclas de helio-argón están disponibles en proporciones de 25, 50 y 75% de helio; obteniendo soldaduras con una penetración más profunda y con una buena acción de limpieza [5]. Hay más proporciones disponibles para la mezcla con diferentes gases.

Aunque el helio y el argón puedan ser usados satisfactoriamente para la mayoría de las aplicaciones de soldadura GTAW, el argón es seleccionado más frecuentemente debido al mejor control del arco y un menor costo.

Se puede añadir hidrógeno (H₂) al argón para soldar níquel-cobre o aleaciones de base níquel. La adición de hidrógeno al argón permite aumentar la velocidad de soldadura, pero no se recomienda usar en otros metales porque producirían grietas en las soldaduras. [5]

1.4.3 Electroodos

Los electrodos utilizados en el proceso GTAW, son catalogados por sus varias de sus características en donde se consideran cinco factores, estos son los que proporcionan información para su adecuada la aplicación en el proceso GTAW, estos factores son el tipo de material, tamaño, forma de la punta, porta electrodo y boquilla.

1.4.3.1 Material del electrodo

El tungsteno es el elemento el cual está presente en los electrodos en el proceso GTAW, este al mismo tiempo contiene varios elementos aleantes los cuales son usados para distintas condiciones de trabajo. De acuerdo con sus elementos aleantes se los cuales clasificar como: tungsteno puro (EWP), tungsteno con 1 o 2% de torio (EWTh-1 y EWTh-2), tungsteno con 0.15 a 0.4% de circonio (EWZr), tungsteno con 2% de cerio (EWCe-2), tungsteno con 1% de lantano (EWLa-2) y tungsteno que contiene un segmento lateral interno de tungsteno de torio (EWTh-3). A lo largo de la longitud del electrodo se encuentra un contenido de torio en un rango del 1 al 2%, por otro lado, al considerar un contenido medio de torios esta proporción varía en un rango de 0.35 a 0.55% de torio [12]. En la figura. 1.10, se muestra a los electrodos con sus códigos de colores.

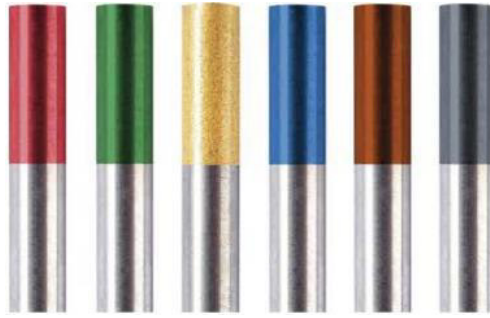


Figura 1.10. Electrodo de tungsteno con bandas de colores. [5]

En la tabla 1.2 se indica el código de colores según los elementos aleantes presentes en donde estos presentan dos designaciones a través las normas ISO 6848 y AWS A5.12.

Tabla 1.2. Identificación de electrodos por colores a, b.

Clasificación AWS	Color	
EWP	Verde c	
EWCe-2e	Naranja	
EWLA-1e	Negro c	
EWLa-1,5	Dorado	
EWLa-2	Azul	
EWTh-1e	Amarillo c	
EWTh2e	Rojo	
EWZr-1e	Café c	
EWG	Gris	

a. Los colores pueden ser aplicados en forma de bandas, puntos, etc., en cualquier punto de la superficie del electrodo, fig. 1.2.

b. El método de codificación de colores usados no debería cambiar el diámetro del electrodo más allá de las tolerancias permitidas.

c. El código de colores se encuentra bajo las especificaciones de la norma ISO 6848.

Las normas que especifican a los electrodos en el proceso GTAW son la norma ISO 6848 y AWS A5.12, en donde detallan y enlistan los parámetros y requerimientos, datos y composición química que poseen estos electrodos de tungsteno [8]. Los electrodos se suministran limpios con acabados superficiales básicos, en donde limpio hace referencia a aplicación de una limpieza química para eliminar impurezas superficiales de las operaciones de estirado y conformado. Estos acabados superficiales básicos indican que las imperfecciones de la superficie son removidas mediante el esmeril.

Los electrodos de tungsteno puro (EWP) resultan ser menos costosos, los mismo que son un 99.5% puros. Una desventaja que presentan este tipo de electrodos es la menor capacidad para transportar corriente en AC, también presentan ventajas en donde su arco es más estable y tiene una baja resistencia a la contaminación. La punta que presenta este electrodo es de forma de bola en el extremo limpio del electrodo, principalmente son utilizados para soldar aleaciones de aluminio y magnesio. [5]

Los electrodos de tungsteno que contienen 1 o 2% de torio (EWTh-1 y EWTh-2) tienen mayor emisividad de electrones, una mayor capacidad de transportar corriente y una vida más larga por acción del óxido de torio (ThO_2), en comparación con el tungsteno puro [5]. El arranque del arco es más fácil y estable lo cual ayuda a hacerlos más resistentes a la contaminación desde el metal base. Mantienen una configuración de punta afilada en soldadura de metales ferrosos.

Los electrodos de tungsteno que contienen circonio (EWZr) tienen propiedades similares al de tungsteno puro y de tungsteno con torio respecto al arranque del arco y capacidad de y transportación de corriente. Estos electrodos son recomendados para la soldadura en AC de aluminio sobre el tungsteno puro o electrodos de tungsteno toriados, manteniendo una punta redondeada durante la soldadura y poseen una alta resistencia a la contaminación [13]. Otra ventaja de los electrodos de tungsteno-zirconio es que están libres del elemento radiactivo torio, el cual, aunque no es peligroso en los niveles usados en los electrodos, es de preocupación para algunos soldadores.

Los electrodos de tungsteno cerio (EWCe) son un producto relativamente nuevo y contienen de 1 a 5% de cerio. Estos no son radioactivos y se reporta que tienen una buena estabilidad de arco permitiéndoles trabajar tanto en AC como DC y duran más que el tungsteno con torio [13]. Se caracterizan por su elevada emisión de electrones, permitiendo una buena penetración y resistencia al desgaste.

Los electrodos de tungsteno que contienen 1% de lantano (EWLa-1), al igual que el de tungsteno con cerio, son relativamente nuevos. El electrodo es no radiactivo y tiene propiedades muy similares a los electrodos de tungsteno con cerio. [13]

1.4.3.2 Tamaño del electrodo y forma de punta

En la figura 1.11 se muestra el tamaño y la forma de la punta de los electrodos de tungsteno, estos factores dependen de: el material base, el espesor, el tipo de junta y la cantidad. Generalmente los electrodos usados en AC o en polaridad positiva (EP) son de mayor diámetro que los usados en polaridad negativa [5]. En la tabla 1.3 se describen las formas de la punta del electrodo a partir de la variación de los diámetros.

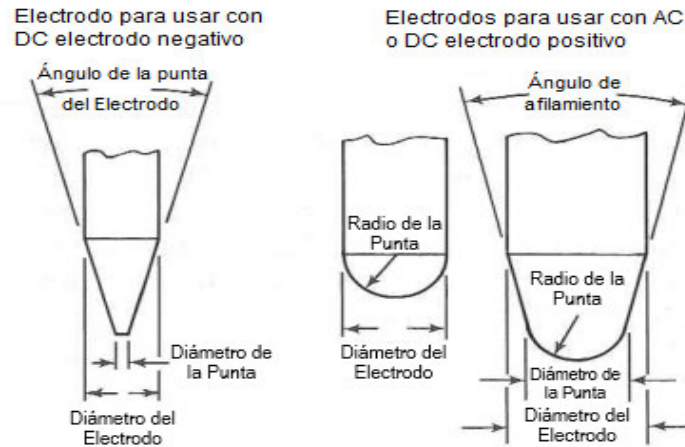


Figura 1.11. Tipos y formas de las puntas del electrodo.

Para la soldadura con DC electrodo positivo y AC, la forma de la punta deseable del electrodo es un hemisferio (bola) del mismo diámetro que del electrodo [5]. Esta forma de la punta en los electrodos más grandes provee una superficie estable dentro del rango de corriente de operación. Los electrodos de tipo zirconio son preferidos para operaciones con DC electrodo positivo y AC debido a que estas tienen una muy alta capacidad de transportar corriente además son capaces de formar con facilidad una bola fundida bajo condiciones de operación normales. Los electrodos con torio no forman una bola fácilmente y, por tanto, estos no son recomendados para la soldadura con DC electrodo positivo o AC.

Tabla 1.3. Formas de la punta del Electrodo.

Diámetro del Electrodo		Diámetro de la Punta		Ángulo en Grados	Electrodo Negativo (DCEN)	
Pulgadas	Milímetros	Pulgadas	Milímetros		Rango, A de Corriente Constante	Rango, A de Corriente Pulsante
0.040	1.02	0.005	0.125	12	2-15	2-15
0.040	1.02	0.010	0.25	20	5-30	5-60
0.062	1.59	0.020	0.5	25	8-50	8-100
0.062	1.59	0.030	0.8	30	10-70	10-140
0.093	2.38	0.030	0.8	35	12-90	12-180
0.093	2.38	0.045	1.1	45	15-150	15-300
0.125	3.18	0.045	1.1	60	20-200	20-300
0.125	3.18	0.060	1.5	90	25-200	25-300

(1) Observar figura 1.11

El electrodo debe ser EWTh2 para ser usado en electrodo negativo

El gas de protección debe ser 100% de argón

La composición del material de aporte debe coincidir con la del material base o ser una varilla recomendada para una aleación base específica

El grado de afilamiento de la punta del electrodo afecta en la penetración de la suelda con ángulos de afilamiento más pequeño tiende a reducir el ancho del cordón de la suelda y así incrementa su penetración. Cuando se prepara el ángulo de la punta en un electrodo, el esmerilado debe ser hecho paralelamente a la longitud del electrodo. En la figura 1.12, se indica una máquina especial para el esmerilado de las puntas electrodos de tungsteno (izquierda) y un esmeril de banco para esmerilar manualmente al electrodo (derecha) con la posición correcta para esmerilar.



Figura 1.12. Máquina para esmerilar la punta del electrodo de tungsteno (izq.) y esmeril simple (derecha). [14] y [5].

Todos los electrodos de tungsteno están disponibles normalmente en diámetros de 0.010" a 0.250" y longitudes de 3" a 24". En la tabla 1.4 se encuentran enlistados los típicos rangos de corriente para estos tipos de electrodos de tungsteno [12].

La longitud total de un electrodo será limitada por la longitud a la cual puede ser acomodada por la antorcha GTAW. Longitudes largas permiten más reacondicionamientos de la punta que longitudes pequeñas, siendo más económicas. La extensión del electrodo desde el collar o mango determina el calentamiento y caída de voltaje en el electrodo. Dado que este calor no es de valor para la soldadura, la extensión del electrodo debería ser tan corta como sea necesario para facilitar el acceso a la junta [5].

Tabla 1.4. Rangos de Corrientes en Electrodo de Tungsteno.

Diámetro del electrodo		Corriente Directa [A]		Corriente Alterna [A]			
		Polaridad Negativa [DC-]	Polaridad Negativa [DC+]	Onda no balanceada		Onda balanceada	
[pulg]	[mm]	EWCe-2 EWLa-1 EWLa-1.5 EWLa-2 EWP EWTh-1 EWTh-2	EWCe-2 EWLa-1 EWLa-1.5 EWLa-2 EWP EWTh-1 EWTh-2	EWP	EWCe-2 EWLa-1 EWLa-1.5 EWLa-2 EWTh-1 EWTh-2 EWZr	EWP	EWTh-1 EWTh-2 EWZr
0.010	0.30	Sobre 15	(2)	Sobre 15	Sobre 15	Sobre 15	Sobre 15
0.020	0.50	5-20	(2)	5-15	5-20	10-20	5-20
0.040	1.00	15-80	(2)	10-60	15-80	20-30	20-60
1/16	1.60	70-150	10-20	50-100	70-150	30-80	60-120
3/32	2.40	150-250	15-30	100-160	140-235	60-130	100-180
1/8	3.20	250-400	25-40	150-210	225-325	100-180	160-250
5/32	4.00	400-500	40-55	200-275	300-400	160-240	200-320
3/16	4.80	500-750	55-80	250-350	400-500	190-300	290-390
1/4	6.40	750-1000	80-125	325-450	500-630	250-400	340-525

(1) Todos los valores están basados en el uso del argón como gas protector. Otros valores pueden ser usados dependiendo del gas protector, tipo de equipamiento y aplicación.

(2) Estas combinaciones no son usadas.

EWCe-2 = Tungsteno + 2% Cerio
 EWLa-1 = Tungsteno + 2% Cerio
 EWLa-1.5 = Tungsteno + 2% Cerio
 EWLa-2 = Tungsteno + 2% Cerio

EWP = Tungsteno Puro
 EWTh1 = Tungsteno + 1% Torio
 EWTh2 = Tungsteno + 2% Torio
 EWZr = Tungsteno + Circonio

1.4.3.3 Porta mordazas y boquillas de gas

Los porta electrodos o mordazas usualmente consisten en dos piezas, un difusor de gas, hechas para acoger con ajuste a cada medida del electrodo de tungsteno, como se presenta en la figura 1.13. Los porta electrodos deben ser capaces de manejar la corriente de soldadura requerida sin sobrecalentamiento [1]. Están contruidos de una aleación de cobre endurecible.



Figura 1.13. Porta electrodos y boquilla de gas. Fuente: [1].

La función de la boquilla de gas es dirigir el flujo de gas inerte alrededor del sujetador y el electrodo y luego al área de soldadura. Las boquillas están hechas de un material fuerte resistente al calor tal como la cerámica y están disponibles en varias medidas y formas como se puede apreciar en la figura 1.14. [1]. Boquillas grandes dan una más completa cobertura del gas al área de soldadura, pero puede ser muy grande para llegar dentro de áreas restringidas. En cambio, las boquillas pequeñas pueden proporcionar una adecuada cobertura del gas en las áreas restringidas donde las características del componente ayudan a guardar el gas en la junta. La mayoría de las boquillas tienen roscas internas las cuales se atornillan sobre la rosca del porta electrodos. Algunas son equipadas con un dispositivo tipo regadera que consiste en algunas capas de una malla de alambre fino o polvo metálico poroso [5]. Estas unidades proporcionan un flujo no turbulento o flujo de gas laminar desde la antorcha resultando en una cobertura de gas inerte a una mayor distancia desde la boquilla.



Figura 1.14. Boquillas de diferentes tamaños y formas. Fuente: [1]

1.4.3.4 Polaridad

En GTAW se puede operar en tres formas diferentes, electrodo negativo (polaridad directa), electrodo positivo (polaridad inversa) o AC como se indica en la figura 1.6. Cuando se usa electrodo negativo, la mayor cantidad de calor se desarrolla en el área de trabajo, por lo cual, es la forma que se utiliza para soldar la mayoría de los metales. El electrodo negativo tiene como desventaja que no proporciona una acción de limpieza en la superficie de trabajo [6]. Esto tiene poca importancia para la mayoría de los metales, debido a que sus óxidos se descomponen o funden bajo el calor del arco, de modo que el metal depositado mojará las superficies de la junta. Sin embargo, los óxidos de aluminio y magnesio son muy estables y tienen puntos de fusión mayores al del metal. No se eliminan por el calor del arco y permanecen en la superficie del metal, restringiendo la humectación. [9]

Con electrodo positivo, la acción de limpieza tiene lugar en la superficie de trabajo por el impacto de los iones de gas, eliminando la fina capa de óxido mientras la superficie está bajo la cobertura de un gas inerte, permitiendo que el metal fundido moje la superficie antes de que pueda formarse más óxido. La desventaja es que la mayor parte del calor se desarrolla en el electrodo de tungsteno y la menor en la pieza. Esto significa que, para obtener la misma intensidad del calor en la pieza con electrodo positivo, la corriente debe aumentarse en un factor de 2.3 [5]. Este aumento de la corriente, más el hecho de que se desarrolla más calor en el electrodo positivo, significa que el electrodo que funciona con polaridad positiva debe disipar aproximadamente cinco veces más calor que un electrodo que funciona con polaridad negativa. Por lo general, un electrodo de polaridad positiva es aproximadamente cuatro veces el diámetro de un electrodo utilizado en polaridad negativa.

En AC, las características deseables de ambas formas se obtienen a un nivel reducido. A 60 Hz AC, la limpieza se obtiene en cada medio ciclo de polaridad positiva y se desarrolla algo de calor en la pieza. El área limpiada en el medio ciclo de polaridad positiva permanecerá limpia durante el medio ciclo de polaridad negativa mientras esté protegida con gas inerte. La mayor parte del calor de soldadura se entrega al trabajo durante el medio ciclo de polaridad negativa.

Al soldar aluminio, puede producirse una rectificación. Si esto ocurre, fluye más corriente cuando el electrodo es negativo como se puede notar en la figura 1.15 B. Esto hace que el arco se vea y suene inestable. Esta condición existe porque la superficie de aluminio limpia no emite electrones tan fácilmente como el electrodo de tungsteno caliente. Esto ocurrirá si se usa fuentes de alimentación de AC de onda sinusoidal antigua. Soldadores con más

experticia incorporan circuitos que pueden equilibrar los semiciclos de polaridad negativa y positiva que se pueden apreciar en la figura 1.15 C. Por lo general, esta condición de equilibrio es deseable para soldar aluminio. [10]

Fuentes de alimentación más modernas incluyen controles que permiten ajustar la AC para favorecer el medio ciclo de polaridad positiva o negativa, indicado en la figura 1.15 A [10]. También, pueden producir AC de onda cuadrada en lugar de una sinusoidal.

Por tanto, para obtener una máxima limpieza, se favorece usar modo positivo del electrodo; cuando se desea el máximo calor, se favorece usar modo negativo del electrodo. Las fuentes de alimentación de onda cuadrada son mucho menos susceptibles a la rectificación del arco que las fuentes de alimentación de onda sinusoidal, aunque a veces sigue ocurriendo.

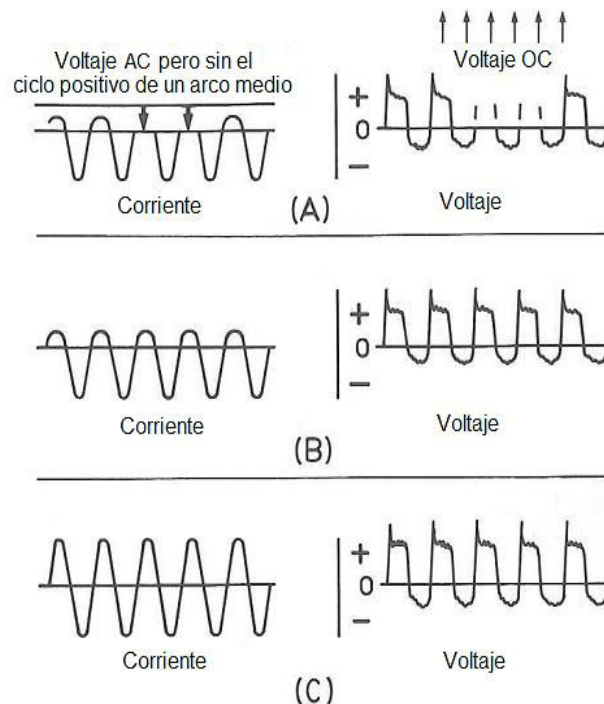


Figura 1.15. a) Onda sinusoidal rectificada sin ciclo positivo, b) onda sinusoidal rectificada para electrodo negativo y c) onda sinusoidal normal. [10]

1.4.4 Características de las fuentes de poder

La corriente característica que deben utilizar las fuentes de poder en el proceso GTAW es de constante caída de voltaje como se muestra en la figura 1.16 A. Además, otras de las características que estas pueden presentar es la pendiente hacia arriba, pendiente hacia

abajo, corriente pulsante igual que programación de corriente. Las fuentes de poder de voltaje constante no deben ser utilizadas para el proceso GTAW ya que estas poseen longitud de arco corta en donde la corriente se tornaría excesiva [1], como se muestra en la figura. 1.16 B.

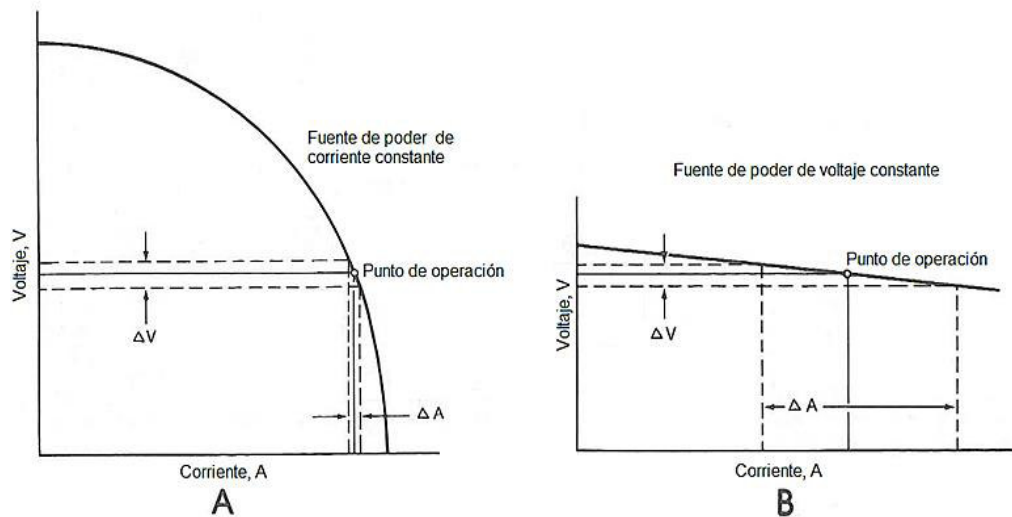


Figura 1.16. A) Característica de corriente constante-caída de voltaje; B) longitud de arco corta, corriente excesiva. [10]

Incluso el transformador rectificador de una fase puede comportarse como una fuente de poder ya que este también puede proporcionar AC para el soldeo en aluminio. Las fuentes de poder tipo motor-generador generalmente son impulsadas mediante un motor a gasolina o diésel y generan DC con la característica de corriente o voltaje constante. Para el proceso GTAW las fuentes de poder del motor alternador generará AC [4]. La fuente de poder tiene la capacidad de operar tanto en corriente constante como en voltaje constante, en donde debe ser ubicada para el modo de corriente constante para el proceso de soldadura GTAW.

La fuente de alta frecuencia para el arranque del arco, válvulas que controlarán el flujo de gas inerte y el enfriamiento con agua de la antorcha, son las características que deben ser tomadas en consideración al construir las fuentes de poder destinadas al uso del proceso GTAW. Los controladores de tiempo facilitan que las válvulas sean abiertas en un menor tiempo previo al inicio del arco de igual forma que éstas sean cerradas en un menor tiempo luego de que el arco sea apagado. La alta frecuencia es necesaria para dar inicio al arranque del arco en lugar de arrancar topando en donde la contaminación del electrodo de tungsteno es probable [6]. Esto debería facilitar ubicar al equipo en alta frecuencia para dar inicio al arco solamente o para operaciones continuas en modo AC.

Las fuentes de poder deberían estar conformadas por un conductor secundario al igual que con medios para controlar remotamente la corriente del arco. En el caso de la soldadura manual, el pedal de pie debería cumplir con estas funciones de operación del contactor y controlador de la corriente de soldadura. Al tener una fuente de poder que posea un rango de corriente simple es óptima ya que esta permitirá que el soldador cambie la corriente de arco entre el mínimo y el máximo sin modificar el rango del interruptor.

Las fuentes de poder más avanzadas poseen características las cuales facilitan pulsar la corriente en el modo DC elementalmente con pulsos cuadrados. Tanto la corriente de pico pulsante como las anteriores pueden ser adaptadas, al igual que la duración del tiempo y la frecuencia de pulsación [6], las mismas que son indicadas en la figura 1.17.

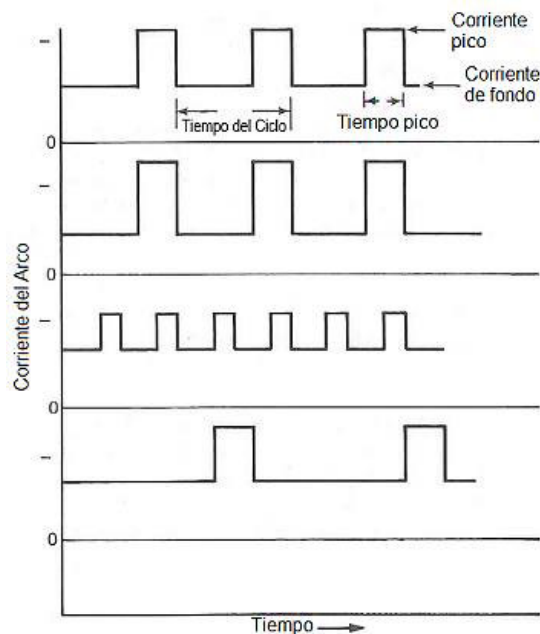


Figura 1.17. Corriente pulsante a cuadros y frecuencia. [10]

Al usar el modo AC la frecuencia básica oscila entre los 60 Hz en donde la onda senoidal puede ser modificada para crear una onda rectangular. En la figura 1.18 se muestran los otros controles que admiten que la onda AC sea equilibrada o variada en beneficio de los medios ciclos positivos o negativos. [6]

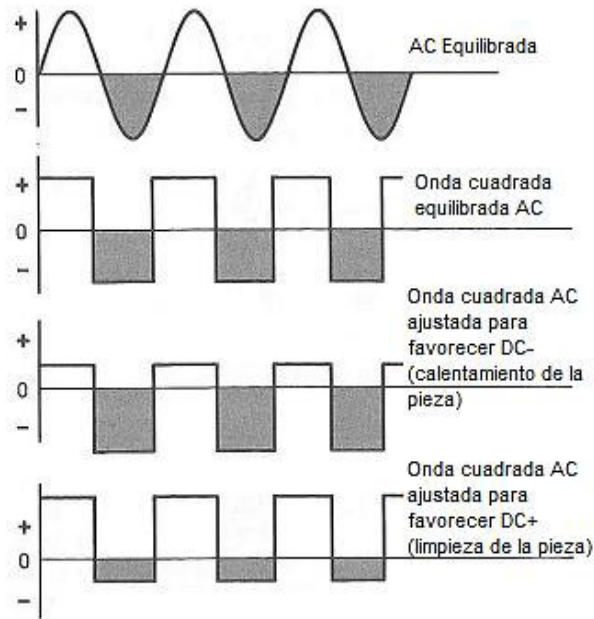


Figura 1.18. Onda balanceada a favor de los medios ciclos positivos o negativos. [7]

Esta cualidad es específicamente apta para soldar aluminio, magnesio en donde el control puede colocarse para favorecer al medio ciclo positivo para limpieza máxima.

La capacidad de pulsación en modo DC admite que la sueldas sean realizadas en material delgado, cordones de raíz y sobre cabeza con menor probabilidad de derramamiento o goteo.

1.4.5 Antorchas

En el proceso de soldadura GTAW el tipo y tamaño de la antorcha debe ser seleccionada a partir del material base de trabajo. La antorcha debe ser adaptada para

manejar una corriente máxima anticipada evitando el sobrecalentamiento. El uso de una antorcha demasiado grande produce fatiga al operador (soldador) incluso esta puede obstruir el acceso para algunas juntas. Para aplicaciones en donde sea necesario el uso de baja corriente, la antorcha puede ser enfriada con gas, esta tiende a ser más liviana y consiguiendo eliminar la necesidad de la conexión de agua. En la boquilla de la antorcha es recomendable ubicar un "gas lens" para optimizar la eficiencia de la protección del gas inerte consiguiendo una disminución en uso del mismo. El diámetro de la boquilla debe ser suficientemente grande de tal forma que esta proporcione el acceso a la junta para brindar una cobertura con el gas inerte en un área más amplia [2]. La distancia que debe existir entre la boquilla (copa) y el electrodo extendido es definida mediante la configuración de

la junta. El mismo debe extenderse lo suficiente para conseguir la junta y dejar que el soldador alcance a visualizar al arco, pero no tanto como para permitir que el gas pueda combinarse tanto con el gas inerte como con la suelta [8]. Usualmente, la longitud óptima de la antorcha en el proceso GTAW oscila entre los 3/8" a 1/2".

Las funciones que debe llevar a cabo la antorcha GTAW son las siguientes:

- Sostener al electrodo de tungsteno de tal forma que este pueda ser manejado a lo largo del proceso de soldeo.
- Suministrar de una conexión eléctrica al electrodo.
- Abastecer de una cantidad suficiente de gas inerte a la punta del electrodo, arco y zona de soldadura caliente.
- Alejar al electrodo de conexiones eléctricas del soldador.

En la figura 1.19 se muestra, la estructura de antorchas típicas usadas en el proceso GTAW.

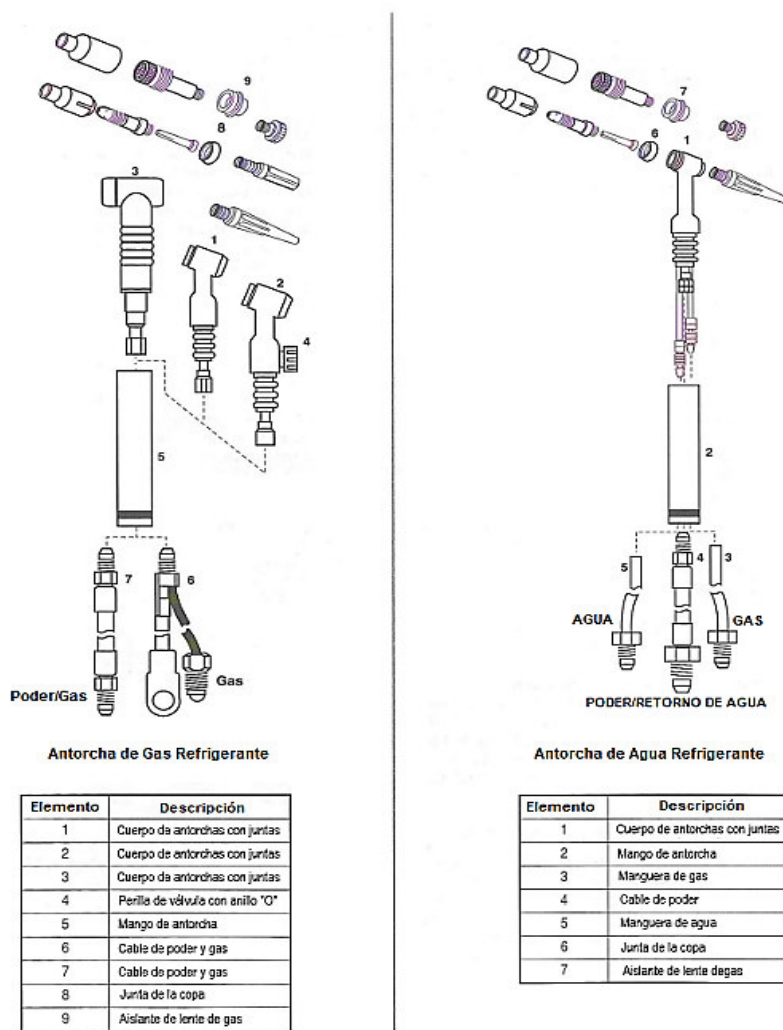


Figura 1.19. Antorchas típicas para soldadura GTAW. [10]

La estructura de la antorcha principalmente está conformada por un cuerpo metálico, un porta electrodo, mordaza, así como de una tapa ajustable la tiene la función de sostener al electrodo de tungsteno. El cable eléctrico tiene una conexión directa al cuerpo de la antorcha el mismo se encuentra dentro de una envoltura aislante plástica exterior. En el caso de las antorchas manuales, el mango mantiene una conexión directa a la envoltura.

Para las conexiones de poder, gas y agua pasan a través del mango o del tope de las antorchas destinada a operaciones automáticas [10]. Para pequeñas antorchas que trabajan con corriente baja tanto el electrodo, el collar como los componentes internos son enfriados mediante el flujo del gas inerte. Para el caso de antorchas más grandes requieren de una corriente alta en donde la fuente de enfriamiento utilizado es el agua en este proceso de enfriamiento se necesitan de conexiones directas a la llave de agua y un drenaje, o ya sea de un enfriador circulador de agua. Para este proceso es recomendable que el circulador posea un medio de enfriamiento con agua destilada o desionizada para evitar la formación de minerales provenientes desde la conexión de agua en el interior de la antorcha.

El flujo del gas inerte atraviesa el cuerpo de la antorcha y huecos en el porta electrodo al extremo del arco de la antorcha. En donde una copa o boquilla es adaptada sobre el extremo del arco de la antorcha para conducir el gas inerte sobre el electrodo y la piletta de soldadura. Las boquillas usualmente son atornilladas en el interior de la antorcha y son fabricadas de una cerámica dura la misma que es resistente al calor. Algunas boquillas están construidas de vidrio Vycor, material que debe soportar altas temperaturas y son prensadas con un plástico comprimible [9]. Determinadas boquillas pueden ser ajustadas mediante una regadera inserta compuesta de algunas capas de mallas de fino alambre, llamada "gas lens", esto crea un flujo laminar del gas inerte, provocando un incremento de la eficiencia de la protección.

La mayor parte de las antorchas manuales en el proceso GTAW, el mango es fijado con un ángulo aproximado de 70° al cuerpo de la antorcha. Determinadas antorchas son las que cuentan con un cuello flexible entre el mango y el cuerpo de la antorcha para ser acoplado en un rango que va de los 50° a 90° . [7]

Las antorchas que son empleadas en operaciones a máquina o automática pueden contar con conexiones de poder, gas y agua en un extremo con el botón de ajuste en la parte superior de la mordaza.

Usualmente otras cuentan con todas las conexiones en la parte superior. Una herramienta especial es necesaria para ajustar el collar desde el extremo del electrodo. Generalmente las antorchas mecánicas son montadas con abrazaderas alrededor del cuerpo de la

antorcha, como se muestra en la figura 1.20.



Figura 1.20. A) tubo guía con interruptor para control de alimentación separado; B) tubo guía con interruptor montado en la antorcha. [9]

1.4.6 Acción de Rectificación y Limpieza en AC

Anteriormente se describe que, al soldar aluminio o magnesio con AC, se tiende a formar una onda balanceada (como se indicó en la figura 1.15 C) y esto ocurrirá ya que el electrodo de tungsteno caliente produce de forma más fácil emisión de electrones a comparación de la superficie del metal. Al trabajar con electrodo negativo resulta un mayor flujo de corriente el cual suministrará más calor en la pileta de soldadura el área que sea necesario. Al referirse del electrodo positivo la cantidad de corriente es más pequeña lo cual resulta aceptable ya que esta proporciona el suficiente flujo de corriente, así como limpieza apropiada de la superficie. Al ser el flujo de corriente más bajo significa que el electrodo de tungsteno proveerá un menor calentamiento.

Durante el proceso GTAW en AC el flujo de corriente pasa por cero dos veces en cada ciclo en donde el arco debe ser reiniciado cada ciclo dos veces [7]. En el momento en el que el electrodo se vuelve negativo, el reinicio se da de forma más rápida, pero al volverse positivo, el reinicio puede retrasarse resultando en corriente baja. Al no reiniciar la corriente en el medio ciclo positivo, se produce la rectificación completa y no habrá la acción de limpieza. La superposición de una continua alta frecuencia sobre la AC asegurará el reinicio del arco al inicio de cada medio ciclo positivo para proporcionar la acción de limpieza de tal forma que minimice el desbalance. Determinadas fuentes de poder nuevas, más avanzadas suministran ondas cuadradas AC en donde el voltaje cambia de máximo

negativo a máximo positivo de forma muy rápida conservando la ionización del arco y el flujo de corriente continuará en cada inversión de voltaje. Considerando estas condiciones la continua alta frecuencia no es fundamental. La amplitud del medio ciclo negativo puede ser aumentada para incrementar la penetración de tal forma que la amplitud del medio ciclo positivo se reduce [7]. En la figura 1.18 se presentó que, para aumentar la acción de limpieza, la amplitud del medio ciclo positivo incrementa de tal forma que la amplitud del medio ciclo negativo disminuye.

1.4.7 Alimentadores de Alambre de Aporte

El alimentador del alambre de aporte para el proceso GTAW automático debe ser apto para alimentar al alambre manteniendo una velocidad controlada desde la bobina o carrete continuo mediante un sistema guía a la piletta de soldadura. El sistema de alimentación de alambre completo está conformado de un soporte para la bobina de alambre, un mecanismo de tracción, un control de velocidad y una guía para conducir desde el mecanismo de tracción hacia la piletta de soldadura. Los alimentadores de aporte son usados con instalaciones de soldadura GTAW con máquina o automáticas, pese a que los alimentadores de alambre son sujetados con la mano estos pueden ser utilizados en la soldadura manual.

El mecanismo de tracción de alambre está conformado por un motor eléctrico, una caja reductora de velocidad de engranaje y un juego de rodillos de tracción. La principal diferencia entre los mecanismos de tracción para el proceso GMAW y GTAW radica en el rango de la velocidad, en donde este rango en el proceso GTAW va desde 20 a 200 pulg/min, en cuanto al rango de tracción en el proceso GMAW va desde los 100 a 1000 pulg/min [7]. Generalmente en el proceso se utiliza solamente un par de rodillos de tracción. Estos rodillos pueden poseer tracción propia o el uno puede poseer tracción y el otro no. Cuando ambos poseen tracción propia se conseguirá una alimentación más positiva con menor deslizamiento. El rodillo de tracción al trabajar con materiales tales como aleaciones de base de níquel y titanio, este posee una ranura estriada en "V". El rodillo el cual no posee tracción propia puede ser plano y liso o poseer una ranura en "V" lisa. La ranura en "V" deberá ser utilizada en los dos rodillos cuando se trata de materiales blandos como el cobre y aluminio [9]. En el caso de los rodillos estriados no deberían ser empleados con alambres suaves ya que existe una tendencia de corte de finas limallas provenientes desde el alambre, las mismas que son trasladadas al tubo de contacto en donde puede ocurrir el atascamiento del alambre. Algunos de los mecanismos de tracción emplean dos pares de rodillos de tracción uno tras de otro, en donde todos presentan tracción. Sin embargo, este arreglo es usado generalmente en procesos de soldadura como el SAW y GMAW en los

que se alimentan alambres más gruesos con altas velocidades a las utilizadas en el proceso GTAW.

La intención de la unidad de control es dejar que la tasa de alimentación del alambre requerida a cualquier velocidad se mantenga variando las condiciones de carga. La mayor parte de estos controles usan la intervención de un circuito electrónico el mismo que es el encargado de comparar el voltaje el cual es proporcional a la velocidad del motor manteniendo un voltaje de referencia. La obtención del voltaje de referencia es a través de la armadura del motor o bien sea del tacómetro montado en el eje del motor [9]. Un switch reversible debería tener el controlador de tal forma que el alambre pueda avanzar o retroceder a lo largo del proceso.

Una vez que el alambre deje los rodillos de tracción, este ingresa al tubo guía enseguida a la boquilla de salida el mismo que posiciona al alambre sobre la piletta de soldadura. El tubo guía generalmente es flexible y está conformado por un forro nylon [5]. Dependiendo de la posición del mecanismo de tracción, así como de la antorcha GTAW la longitud del tubo puede variar desde unas pequeñas pulgadas hasta algunos pies de longitud. Mediante un sujetado la boquilla de salida es montada cerca a la antorcha, esté sujetado proporciona de un ajuste por medio de tornillos para la correcta posición del ángulo. En la soldadura GTAW manual como se muestra en la figura 1.20 A el alimentador de alambre debe ser utilizado, en donde el soldador sostiene el extremo de la boquilla del tubo guía en una mano y en la otra la antorcha GTAW.

A través del tubo guía o el pedal de pie pueden ser los medios de control de la alimentación ya sea para su inicio o el pare propicio. Las antorchas manuales están disponibles con el alimentador de alambre sujetado al tubo guía. Esto requiere solamente el uso de una sola mano la cual se puede observar en la figura 1.20 B.

1.4.8 Soldadura de metales ferrosos

El grupo de los aceros aleados viene a representar a uno de los más importantes desde el punto de vista industrial, a través del sistema de identificación AISI los aceros son designados en sus correspondientes grupos. A partir de ello se clasifican de acuerdo con su composición. Para reducir la perspectiva de varios de estos grupos de aceros usados industrialmente, se plantea una clasificación en varios grupos, los mismos que agrupan las suficientes propiedades, así como los elementos aleantes que los conforman y que son designados para un determinado trabajo, como se muestra a continuación:

- **Aceros al carbono**
- Aceros aleados
- Aceros grado herramienta

- Aceros para usos especiales
- **Aceros inoxidables**

Este grupo de aceros contienen una composición de elementos aleantes de carbono más hierro, en donde el porcentaje de carbono está alrededor del 1.2%, en donde la mayor parte los aceros contiene un porcentaje de carbono menor al 0.5% lo cual se logra a partir de la oxidación del carbón, así como de otras impurezas del arrabio hasta disminuir al nivel deseado de contenido de carbono. [11]

1.4.8.1. Soldabilidad de Aceros al carbono

Para este proceso se debe tomar en cuenta que existe una clasificación de este grupo, esto se puede notar según el porcentaje de contenido de carbono, a partir de ellos se clasifican principalmente en tres grupos aceros de alto, medio y bajo contenido de carbono.

Tabla 1.5. Clasificación del grupo de aceros al carbono. [9]

Denominación	%C	Aplicaciones	Soldabilidad
Acero de bajo carbono	0.15% máximo	Electrodos para soldadura, láminas y chapas	Excelente
Acero suave	(0.15-0.30) %	Perfiles y barras estructurales laminados	Buena
Acero de medio carbono	(0.3-0.50) %	Partes de máquinas	Poca (Proceso de precalentamiento y postcalentamiento)
Acero de alto carbono	(0.50-1) %	Resortes, troqueles, rieles de ferrocarril	Baja (Difícil soldar sino se precalienta y postcalienta de forma correcta).

1.4.8.1.1. Aceros de alto contenido de carbono

Este grupo de aceros se caracteriza por poseer un porcentaje de carbono superior al 0.6%, en donde son metales caracterizados por su mala soldabilidad que aún con el aporte de técnicas complementarias no se estaría garantizando la correcta unión de soldeo, así como la calidad de esta. El proceso GTAW es uno de los procesos de soldeo apropiados para la unión de este grupo de ya que este asegurara juntas de alta calidad, para alcanzar una soldadura óptimo es necesario el uso de electrodos de bajo hidrógeno, así como la aplicación

de un previo proceso de precalentamiento, generalmente en material de mayor espesor, posterior a la soldadura también se debe considerar la aplicación de tratamientos térmicos como el alivio de esfuerzos y recocido. [8]

1.4.8.1.2. Aceros de medio contenido de carbono

En este grupo de aceros de medio contenido de carbono poseen rango de carbono el cual oscila desde el 0.3% hasta 0.59%, son considerados por tener una soldabilidad limitada o condicionada en donde este requiere de técnicas adicionales para conseguir uniones de alto grado de calidad, estas técnicas pueden ser tratamientos térmicos una vez finalizada la soldadura, proceso de precalentamiento considerando un rango de temperatura que va desde los 150 a 260 °C, así como un adecuado proceso de enfriamiento de tal forma que no se forme fisura o agrietamientos al largo del cordón de soldadura.

1.4.8.1.3. Aceros de bajo contenido de carbono

El porcentaje de carbono que contiene este grupo de aceros puede ser valores de hasta un 0.29%, los cuales al poseer esta cantidad de carbono son considerados por poseer una excelente soldabilidad, en donde no es necesario la aplicación de técnicas adicionales para adquirir una alta calidad en el cordón de soldadura.

Las aplicaciones a los que son destinados este grupo de aceros es la fabricación industrial, así como en la construcción metálica, el mismo que puede ser soldado por varios procesos de soldadura entre los más utilizados son GTAW, SMAW, FCAW y GMAW. [8]

1.4.8.2. Aceros aleados

Este grupo de aceros la mayoría de estos forman parte del grupo de aceros inoxidables, así como aceros destinados a la elaboración de herramientas, debido a su elevado contenido de carbono y otros porcentajes de elementos aleantes los cuales aportan para mejorar sus propiedades mecánicas como la elevación de la dureza y su resistencia a ser soldados.

1.4.8.2.1. Aceros de baja aleación

Los elementos aleantes que conforman a este grupo de aceros son el Níquel, Cromo, Manganeso, Silicio, Vanadio, Aluminio, Boro y Molibdeno. Al ser conformados por pequeñas porciones de estos elementos, estos ayudan a transformar sus propiedades mecánicas, su aplicación principal es el sector automotriz debido a que estos pueden ser sometidos a bajas y altas temperaturas. [8]

1.4.9 Soldadura en Aceros inoxidables

Las propiedades de los aceros inoxidables son distintas a las de los aceros al carbono, por ello este grupo de aceros necesitan de una detallada revisión de sus propiedades antes de ser expuestos ante el proceso de soldadura, de esta forma se conseguirá uniones de alta calidad y libre de imperfecciones. De esta correcta selección de estos materiales dependerá la adecuada calidad de la soldadura, así como ayudará a evitar la formación de defectos en la zona de trabajo., en donde la utilización del acero inoxidable es destinada a fabricaciones de alta calidad.

Al emplear el proceso de soldadura GTAW en aceros inoxidables estos necesitan de la intervención de un gas de protección estos pueden ser helio, argón o una mezcla de ambos, este proceso al trabajar con metales de bajo espesor este generará una disminución de ingreso de calor y como resultado se obtendrá un cordón de soldadura de alta calidad. [8]

Diseño de la unión

En el momento del diseño de debe considerar que al tener una junta muy angosta dificultará la aplicación del material de aporte así como la limpieza, de igual forma pasa al tener juntas muy separadas, en este caso se requiera de una mayor aplicación de material de aporte lo que resultaría económicamente alto, para evitar se es recomendable la mantener una separación equitativa entre la raíz con el diámetro del electrodo, manteniendo un ángulo de la unión semejante a los 60° al trabajar con biseles tipo V.

1.4.9.1 Soldabilidad de los aceros inoxidables austeníticos

Este grupo de aceros inoxidables poseen una alta resistencia a la corrosión aun si son sometidos a trabajar en ambientes corrosivos, por lo general estos presentan mejores condiciones en relación con los aceros martensíticos y ferríticos, una de las desventajas que presentan es la sensibilidad al trabajar en ambientes que contiene partículas de cloruro provocando el agrietamiento por corrosión.

Estos presentan alta resistencia al ser sometidos a elevadas temperaturas, lo cual se ve influenciado en la aplicación del proceso de soldadura el cual es de excelente calidad. Su proceso de enfriamiento se da únicamente al ser sometidos al trabajo en frío, estos poseen un menor punto de fusión en relación con el grupo de acero al carbono, alcanzado expansiones térmicas superiores al 50%. [10]

1.4.9.2 Soldabilidad de los aceros inoxidables ferríticos

Para este caso el proceso de soldabilidad es más alta que los grados martensíticos, pero a la vez menor que los grados martensíticos, con el porcentaje de cromo presente en este grupo de aceros este tiende a aumentar su resistencia, pero al no presentar contenido de níquel este tiende a ser susceptible a la corrosión.

El proceso de precalentamiento antes de iniciar el proceso de soldadura en donde las temperaturas óptimas de trabajo se encuentran en un rango que van desde los 850 °C hasta los 900 °C, en el caso de trabajar con metales con un espesor mayor las temperaturas de precalentamiento van desde los 700 °C a 800°C, para continuar con un adecuado procedimiento de enfriamiento.

1.4.9.3 Soldabilidad de los aceros inoxidables martensíticos

En este tipo de aceros se debe considerar la aplicación de técnicas adiciones pre y post a la aplicación del proceso de soldadura debido a que este tiende a la creación de tensiones, así como la formación de grietas.

En el proceso de soldeo es indispensable la aplicación del material de aporte en base de aleaciones austeníticas, esto ayudará a la absorción de las tensiones provocadas por las elevadas temperaturas en el proceso a lo largo del cordón de soldadura.

Entre las técnicas adicionales de aplicación pueden ser considerados el proceso de precalentamiento aplicado en un rango de temperatura entre los 300 y 350 °C una vez ya aplicado el proceso de soldadura para después aplicar un proceso adecuado de enfriamiento tras la aplicación de un tratamiento térmico de revenido a temperaturas de 600 hasta 700 °C.

[10]

1.4.9.4 Soldabilidad de los aceros inoxidables endurecidos por precipitación (PH)

Este grupo de aceros inoxidable consta varios elementos en su composición como son: níquel, cromo también cuenta con cobre, titanio y molibdeno. Poseen buenas propiedades mecánicas en donde destaca la excelente resistencia a la corrosión, ductilidad, los mismos también poseen una alta resistencia a elevadas temperaturas por consecuencia presentan una buena soldabilidad.

1.4.9.5 Soldabilidad de aceros inoxidable dúplex

Este grupo de aceros inoxidable se destacan por poseer la propiedad de magnetismo, así como la excelente capacidad de soldabilidad, los tratamientos térmicos no logran su endurecimiento. Su composición consta de varios elementos aleantes, en donde el porcentaje de cromo va desde un 18% a 26%, así como un 4.5% a 6.5% de porcentaje de níquel, en donde diferentes son las aplicaciones que son destinados en intercambiadores de calor y como componentes en plantas de tratamiento de agua.

1.4.10 Diagrama de fases

En la figura 1.21 se muestra el diagrama de equilibrio Cromo – Hierro, en donde a través de este se puede interpretar los conceptos básicos y fundamentales de los aceros inoxidable.

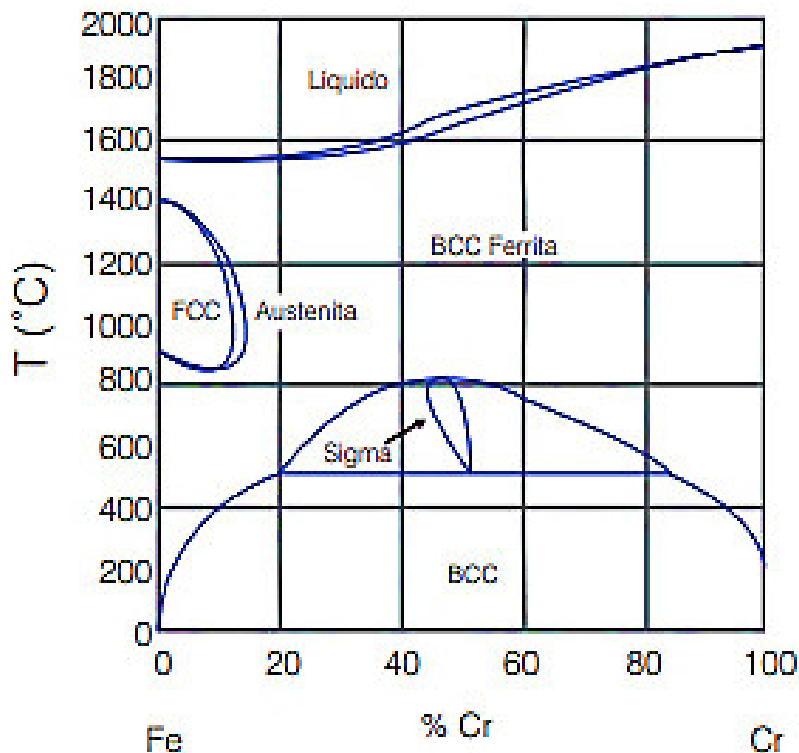


Figura 1.21. Diagrama de equilibrio Cromo-Hierro. [10]

Análisis del diagrama Cromo-Hierro

- En la figura 1.21 se puede notar que las aleaciones que poseen un porcentaje de cromo menor al 12% convierten su estructura de ferrítica a austenítica a lo largo del proceso de calentamiento. Por otro lado, existe transformación de austenita a martensita durante el proceso de enfriamiento rápido producido a temperatura ambiente.
- El cromo comprendido en un rango entre un 12 a 13% en aleaciones de hierro al ser

sometido altas temperaturas se crea estructuras bifásicas, las mismas que al ser sometidas a un enfriamiento rápido, se producirá la estructuras ferríticas y martensíticas.

- c. Por otro lado, se puede notar en la figura que al contener un porcentaje mayor al 13% conserva la estructura ferrítica, considerando temperatura ambiente hasta alcanzar el punto de fusión. El contenido de carbono es un factor el cual influencia este tipo de aleaciones en donde este debe ser limitado para evitar la expansión del campo gamma y de esta forma impedir la formación de martensita, como se indica en la Figura 1.22. [10]

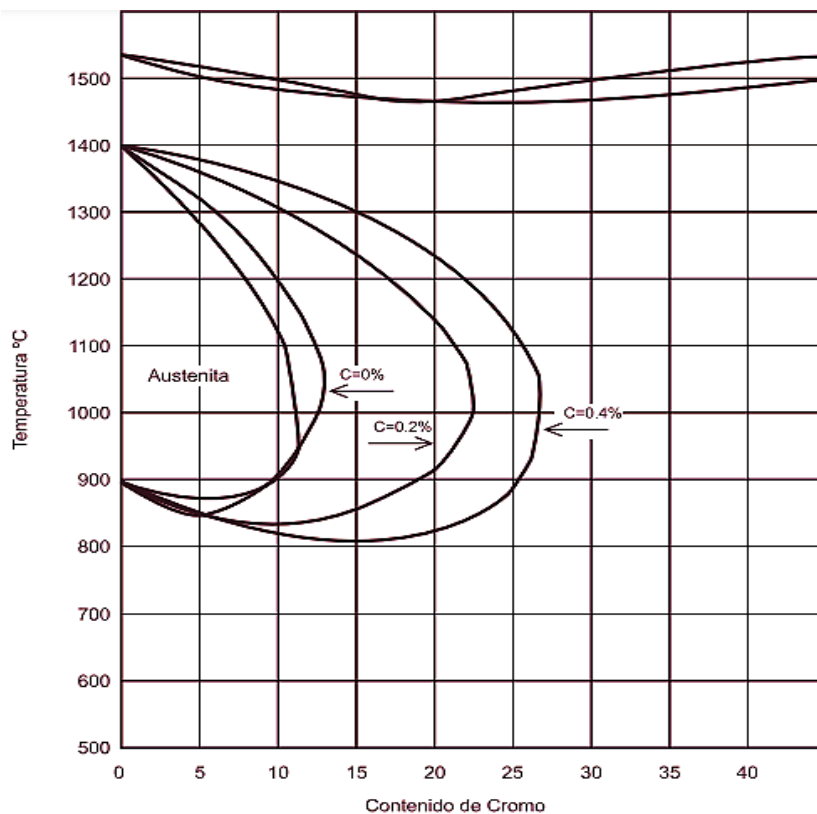


Figura 1.22. Fase gamma influenciada por el contenido de carbono.

Características de la influencia del contenido de carbono en la zona gamma.

- La zona gamma es influenciada por el contenido de carbono en donde esta zona tiende a expandirse hacia la derecha al incrementar el porcentaje de carbono.
- El contenido de carbono máximo que se puede alcanzar es de 0.6% en donde existe una limitación de la zona para el cromo con un porcentaje aproximado del 18%.
- Al poseer un contenido del cromo del 17% se puede conseguir la formación de aleaciones Fe-Cr-C las mismas que a temperatura ambiente pueden ser fase martensítica.

Clasificación de los aceros inoxidable de acuerdo con su microestructura.

Básicamente existen 3 grupos de aceros inoxidable, austeníticos, ferríticos y martensíticos que son mayormente conocidos y utilizados industrialmente debido a sus excelentes propiedades mecánicas y su fácil maleabilidad en diferentes procesos, además estos pueden trabajar a temperatura ambiente pero los últimos años se ha adentrado a la industria los aceros endurecidos por precipitación, así como el aceros inoxidable dúplex el mismo que ha despertado interés dentro de la zona metalúrgica, en la figura 1.23 de muestra esta clasificación.

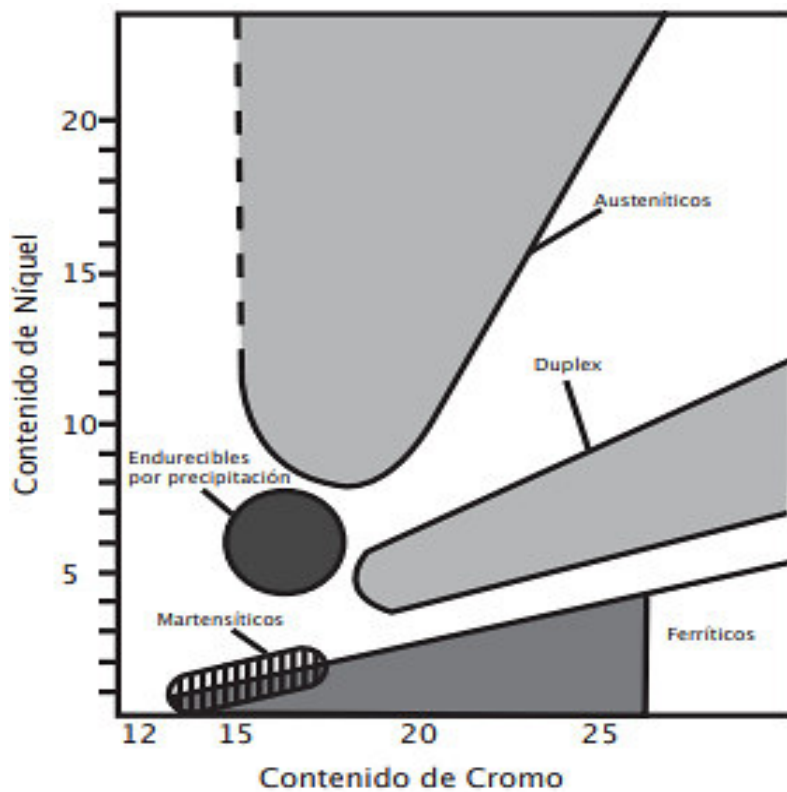


Figura 1.23. Clasificación de los aceros inoxidable según su microestructura.

2. METODOLOGÍA

2.1 Análisis de los parámetros de operación más relevantes del proceso GTAW.

Varios son los parámetros de operación que se deben considerar al momento de soldar con el proceso GTAW, ya que estos ayudaran a que el proceso de soldeo obtenga características idóneas al ser aplicado, estos dependen del espesor del material con el cual se vaya a trabajar, así como de su aplicación, al tomar en cuenta estos parámetros se conseguirá buena penetración, excelente acabado superficial, correcta continuidad en el cordón de soldadura, entre otros.

2.1.1 Establecimiento de los parámetros de soldadura

Los parámetros de una soldadura son determinados a partir de los requerimientos de material, espesor, diseño de la junta y servicio; obteniendo la corriente, el gas inerte, el voltaje y la velocidad de avance. Se puede encontrar esta información en un P.Q.S ("Especificación de la Calificación del Procedimiento" ["Procedure Qualification Specification"]) o en un manual del material y espesores. Los valores obtenidos deben considerarse como valores iniciales, debido a que los valores definitivos son establecidos al realizar varias pruebas de las partes. Parámetros como la velocidad de avance en soldadura manual dependerá de la habilidad y experiencia del soldador, así como de otros factores.

2.1.2 Composición del Electrodo y Forma de la Punta

En la tabla 1.3 se detalla información de las diferentes características de los electrodos de tungsteno disponibles como la composición del electrodo, tamaño y configuración de la punta, en caso de que no se encuentren detallados en el PQS. En GTAW se recomienda usar los electrodos de tungsteno con 2% de torio para la mayoría de las soldaduras con DC electrodo negativo. En la tabla 1.4 se presentan los diferentes diámetros de los electrodos y la configuración de la punta en varios rangos de corriente. Si se desea soldar aluminio se recomienda usar electrodos de tungsteno con circonio con DC electrodo positivo o se puede soldar usando AC. Estos electrodos deben tener la punta esférica del mismo diámetro que el electrodo, como se observa en la figura 1.11. Para lograr tener esta punta esférica [5], se forma una bola en el extremo del electrodo de la siguiente manera:

1. Al electrodo de tungsteno se lo afila a lo largo del ahusamiento con una punta de aguja y se deja un acabado liso tras pulir con una banda de lija.
2. Se inserta el electrodo en la antorcha, la punta debe extenderse 1/2" fuera de la copa o boquilla de gas.
3. Sujetar la antorcha con el electrodo en vertical sobre una placa de cobre de 1/8" o más de espesor, y establecer un arco usando DC electrodo positivo con arranque de alta frecuencia.
4. Incrementar gradualmente la corriente del arco hasta que se forme una bola en la punta del electrodo, luego reducir la corriente a cero y medir el diámetro de la bola. Repetir este procedimiento hasta obtener el diámetro de la bola deseada.

2.1.3 Gas de Protección y Caudal de Flujo

Los gases inertes son utilizados dependiendo de las propiedades del metal base a soldar, la calidad de la soldadura requerida y cuán económico es usar estos gases en las diversas aplicaciones en GTAW. El argón es recomendado como el gas de protección para la mayoría de las aplicaciones debido a que provee un arco más suave, un voltaje de arco más bajo lo cual es más fácil de controlar que el arco con helio [16]. El caudal depende sobre todo del tamaño de la boquilla de la antorcha, la distancia entre la antorcha y la pieza y del movimiento de aire. Un caudal normal puede ser de 15-30 pies³/h [7].

El helio o las mezclas de helio-argón son recomendadas para la soldadura de secciones gruesas, materiales con alta conductividad térmica y de alta temperatura de fusión, debido a que el arco de helio tiene una entrada de calor más alta. En condiciones similares, el caudal de helio será dos a tres veces a la del argón para proveer la misma cobertura del gas.

2.2 Preparación para la Soldadura

La preparación de la soldadura es un parámetro para considerar antes de realizar cualquier soldadura, se deben preparar adecuadamente los componentes, como lo son: el diseño de la junta, preparación de la junta, limpieza y ensamblaje.

2.2.1 Diseño de la Junta

Las juntas normalizadas utilizadas en otros procesos de soldadura pueden ser usadas para GTAW. El diseño de una junta específica será realizado por un ingeniero o diseñador y dependerá de los componentes, material y requerimientos del servicio.

Las juntas más comunes son: a tope, traslape, en esquina, de borde y en T; en la figura 2.1 se presentan estas juntas.

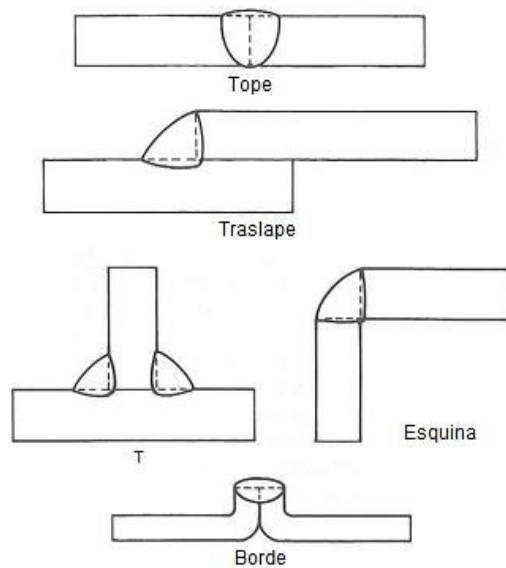


Figura 2.1. Juntas típicas de soldadura. [11]

2.2.1.1 Juntas a Tope

Se puede utilizar junta a tope con borde cuadrado para materiales delgados de hasta 1/8" de espesor. Para realizar una suelda con penetración total sin material de aporte, se debe preparar los bordes para que se alineen adecuadamente con el mínimo espaciamiento presentado en la figura 2.2. En el caso de juntas con borde cuadrado el montaje con espaciamiento ayudará a alcanzar la penetración total, pero se debe añadir el material de aporte para rellenar el espaciamiento.

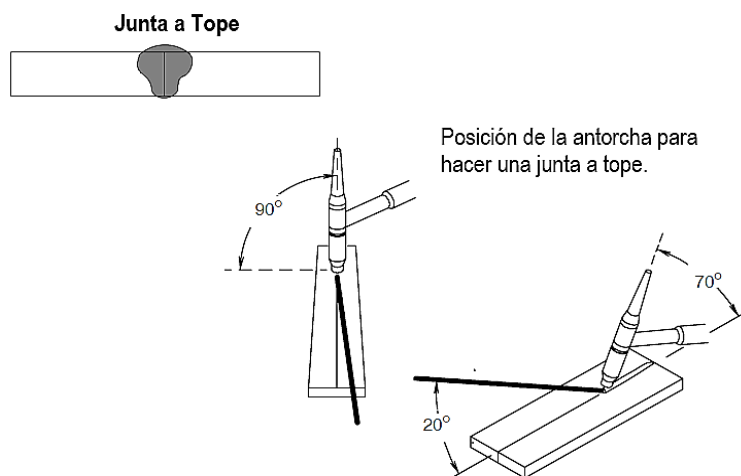


Figura 2.2. Posición para realizar juntas a tope. [7]

Las láminas finas pueden tener un reborde formado sobre los bordes que se están topando,

proveído por el metal de aporte y que ayuda a alcanzar la penetración total con una corriente moderada. Las juntas en placas de espesor mayor a 1/8" requerirán una preparación del borde tal como una ranura en "V" o en "J". Se puede usar ranura doble "V" o doble "J" en placas mayores a 1" si la junta es accesible por ambos lados. En la figura 2.3, se enlistan algunas dimensiones recomendadas para juntas a tope y en T.

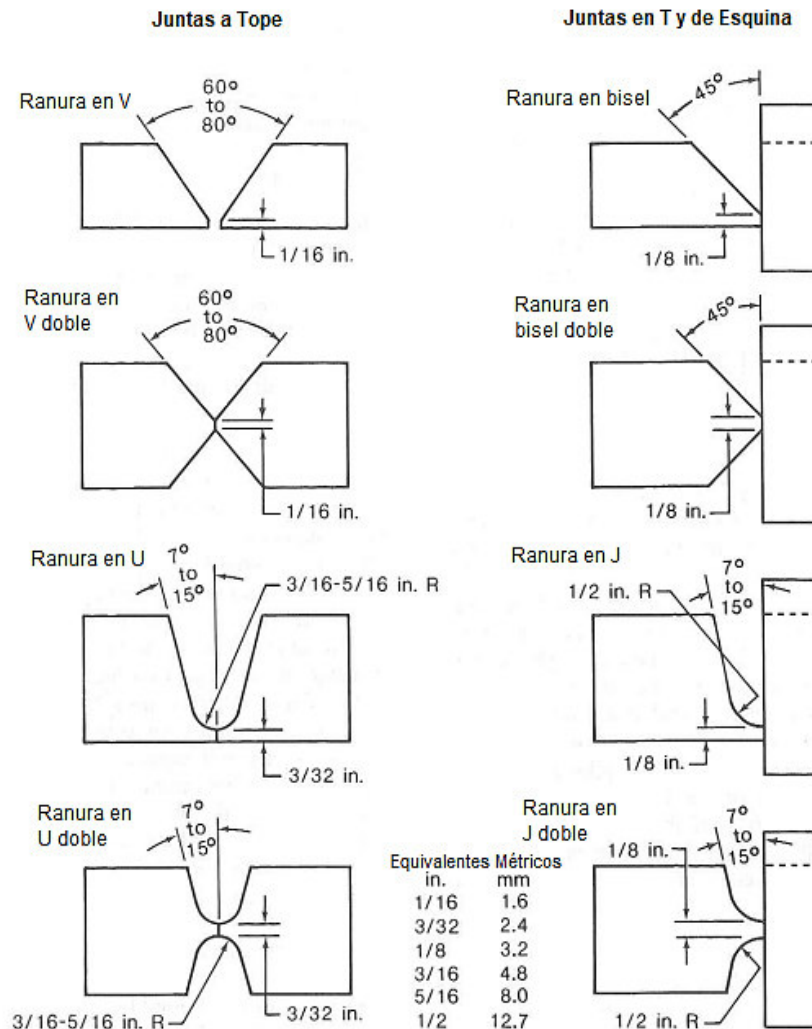


Figura 2.3. Dimensiones recomendadas para juntas a tope y en T. [18]

En materiales gruesos puede ser más económico hacer el cordón de raíz y uno o dos cordones de relleno por GTAW y llenar el resto de la junta con un proceso de deposición más rápido tal como SMAW o GMAW. El factor importante a considerar es el material base y la calidad de soldadura requerida. En el caso de metales ferrosos, los procesos SMAW y GMAW producen soldaduras de calidad y juntas apropiadas. Para soldar juntas en aleaciones y aleaciones de base de níquel donde se aplican estrictas limitaciones de porosidad y propiedades mecánicas, el proceso GTAW sería el mejor para alcanzar soldaduras aceptables.

2.2.1.2 Juntas Traslapadas

Las juntas traslapadas para láminas y placas delgadas requieren una mínima preparación de la junta.

El factor importante es que las láminas traslapadas hagan un buen contacto a lo largo de toda la longitud de la junta, por tanto, no se desea que se tenga rebabas ni indentaciones que causen separación de las áreas. Las juntas traslapadas para láminas con espesores de 1/8" o menos pueden ser soldadas sin metal de aporte por fusión del borde de láminas superior con la lámina inferior. Este proceso debe realizarse con cuidado para asegurarse que la soldadura esté adecuadamente fundida a la lámina inferior sin causar pandeo o una fusión continua.

En juntas con placas de espesores de 1/8" hasta 1/4" requerirán la adición del metal de aporte de una o más pasadas, la cual debe ser aplicada con mucho cuidado para asegurar que el depósito esté adecuadamente fundido a la placa inferior; en donde el correcto uso de la inclinación del ángulo efectuará una adecuada penetración como se muestra en la figura 2.4.

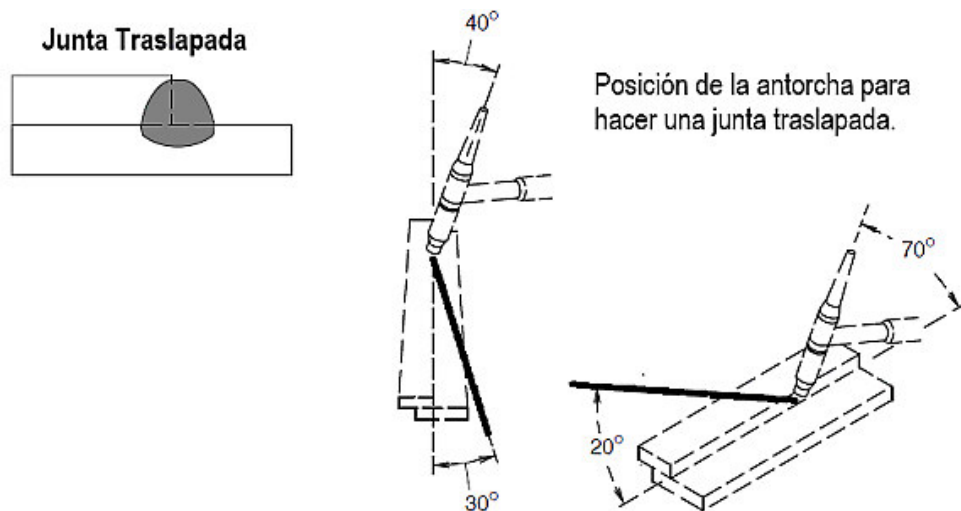


Figura 2.4. Posición de la antorcha para hacer la junta traslapada. [7]

2.2.1.3 Juntas en Esquina

La preparación de las juntas de esquina depende del espesor y el material. En materiales delgados los bordes pueden unirse topándose con una lámina ligeramente sobre traslapada al borde de la otra. Es requerido sujetar los bordes para prevenir su separación por combado durante la soldadura, por medio de alguna instalación. En donde la correcta inclinación de esta es de 70°, como se indica en la figura 2.5.

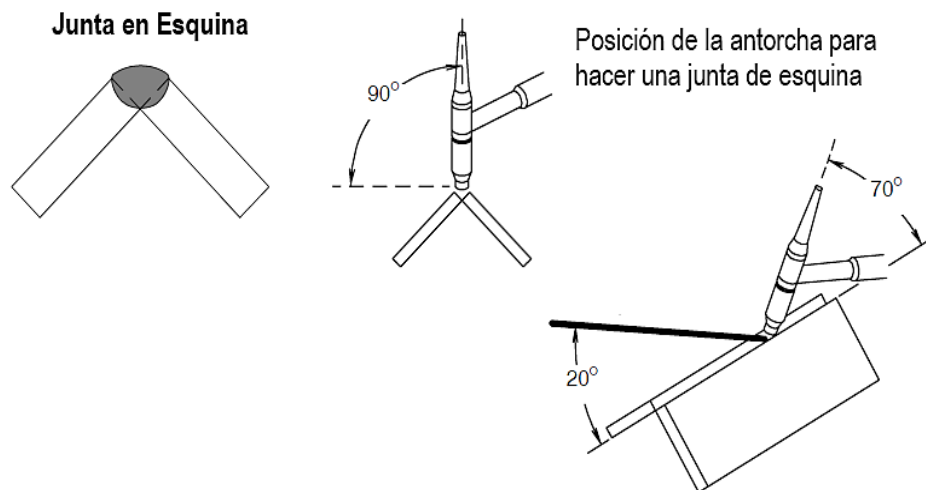


Figura 2.5. Posición de la antorcha para una junta en esquina. [7]

El área de la junta debería estar limpia, es decir, libre de aceite, grasa, pintura, sucio y óxido. Estas juntas pueden ser soldadas por fusión de los bordes de manera simultánea sin añadir el metal de aporte. No obstante, una barra de respaldo debería ser usada para prevenir la fusión continua. Un material más grueso requerirá una preparación de la ranura en bisel o en "J" de una de las placas para permitir la penetración total. Al preparar la junta es importante maquinar los bordes rectos y uniformes lo cual ajustará adecuadamente la junta. Las juntas con preparación de bordes requerirán la adición del metal de aporte y de dos o más pasadas para finalizar la soldadura. La cara de la raíz y la preparación del borde debe ser tal que la penetración total de la raíz pueda ser obtenida en la primera pasada a lo largo del tope, con el fin de evitar la excesiva fusión continua.

2.2.1.4 Juntas en T

Las juntas en T usualmente requieren la adición del metal de aporte en cada lado de la junta con cordones de filete. Dependiendo de los requerimientos, los cordones pueden ser continuos en ambos lados, intermitentes en ambos lados o intermitente en un lado y continúa en el otro. Cuando no se requiere una penetración total en la raíz, solo se necesita preparar en la junta un borde cuadrado en el miembro vertical. Si se requiere una penetración total en la raíz en el miembro vertical para espesores mayores de 1/4" o más, es recomendable una preparación en ambos lados del miembro vertical y realizar la soldadura en ambos lados para minimizar la distorsión, como se indica en la figura 2.6.

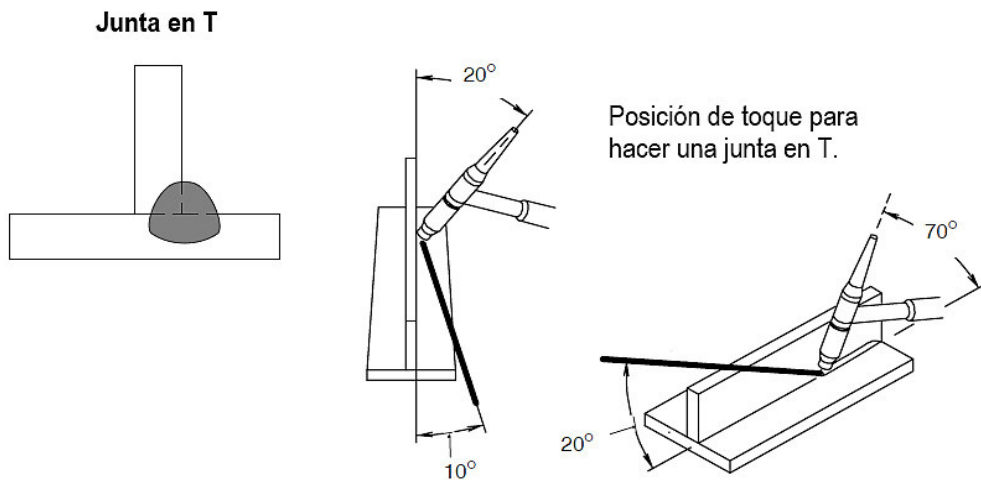


Figura 2.6. Posición para una junta tipo T. [7]

2.2.1.5 Junta de Reborde

Estas juntas son normalmente usadas para unir dos láminas delgadas a lo largo de un borde común. No se requiere metal de aporte debido a que los bordes de las láminas se funden para formar la junta. Esta junta comprende de hendiduras en la raíz por lo cual sería susceptible a fallar con esfuerzos bajos y corrosión bajo ciertas condiciones. Por lo tanto, las condiciones de servicio deben ser examinadas cuidadosamente.

2.3 Manejo de la Antorcha y Adición del Metal de Aporte

Para realizar una soldadura en posición plana, las superficies deben estar limpias y libres de óxido. Se conecta la fuente de poder en DCEN (Polaridad directa), se ajusta el flujo de gas y la corriente para el procedimiento de soldadura requerido.

Se sujeta la antorcha en una mano con un ángulo de 75° en la dirección de avance, como se observa en la figura 2.7 A, y el electrodo debe tener una separación al metal base de $1/4"$. Se presiona un poco el pedal del pie para cerrar el contactor e iniciar la alta frecuencia, la cual en el panel debe estar colocada en "arranque de alta frecuencia", acto seguido se mueve la antorcha lentamente hacia abajo, a la placa, hasta que se establezca un arco. Una vez encendido el arco se puede incrementar la corriente al valor requerido presionando todo el pedal y se debe mantener esta posición hasta que se establezca la pileta como se muestra en la figura 2.7 B. Con la otra mano se sujeta el metal de aporte con una extensión de al menos $10"$ y se alimenta a la pileta en el extremo delantero de esta con un ángulo aproximado de 15° con la placa, esto se puede apreciar en la figura 2.7 C.

Luego se retira el metal de aporte fuera de la pileta ligeramente y se funde el metal añadido dentro de la pileta moviendo la antorcha hacia delante, como se muestra en las figuras 2.7 D y E. [18]

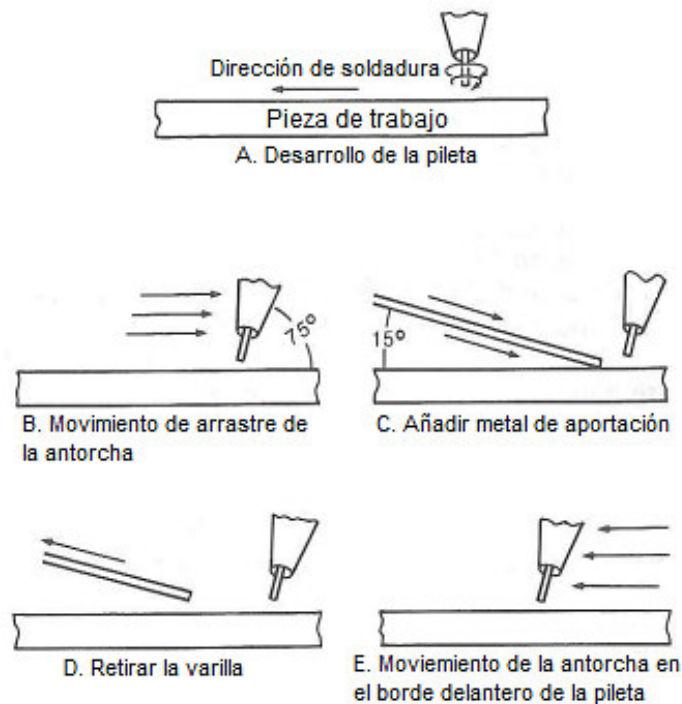


Figura 2.7. Manejo de la antorcha y adición del metal de aporte.

Es importante no retirar el metal de aporte fuera de la protección del gas inerte con el fin de prevenir la oxidación del extremo caliente. Finalmente se mueve la antorcha hacia atrás ligeramente y se alimenta de más metal de aporte dentro de la pileta; este proceso se repite hasta obtener el cordón completo. Al momento de añadir el metal de aporte, se debe evitar que este toque al electrodo de tungsteno porque esto contamina al electrodo y causará un arco inestable [19]. Si esto pasa el electrodo debe ser removido y esmerilado o reemplazado. En caso de requerir más de un cordón, se repite el procedimiento añadiendo cordones hasta que la ranura es rellenada.

En este proceso el soldador debe usar guantes para soldar en ambas manos, para proteger sus manos y antebrazos de la radiación del arco, evitando así quemaduras y graves problemas en la piel. Además, el soldador se mantiene protegido de choques eléctricos en caso de que el metal de aporte entrara en contacto con el electrodo.

Para hacer una soldadura a tope en posición vertical, se sostiene a la antorcha con un ángulo de 90° a la superficie a ser soldada, y se realiza la soldadura desde arriba de la junta. La pileta se desarrolla de la misma manera que en posición plana y se mueve hacia abajo con cuidado para no desarrollar piletas grandes que podrían deslizarse hacia abajo.

Si se necesita añadir material de aporte, se debe agregar el material en el borde delantero de la pileta sosteniéndolo con un ángulo cercano a 15° hacia abajo desde la junta. Se añade el material cuando la antorcha es movida atrás y para fundir el material añadido se mueve la antorcha hacia abajo, repitiendo este paso hasta que la soldadura esté completada. El metal fundido en las posiciones vertical, sobre cabeza y plana se diferencian por cómo se sostienen por la acción capilar. Si se tiene una pileta muy grande, la fuerza gravitacional será más grande que la fuerza capilar y el metal líquido correrá hacia abajo [19]. Por eso el tamaño de la pileta fundida debe ser limitado en la soldadura vertical y sobrecabeza.

2.4 Comparación del gas de protección

Al soldar metales y aleaciones las cuales son susceptibles ante la contaminación atmosférica es importante proporcionar una protección la cual evite esta contaminación, el uso de un determinado gas de protección ayudará a la obtención de zonas de soldadura más limpias y sin ningún tipo de agentes contaminantes, en la tabla 2.1 se realiza una comparación de todos los gases que son utilizados en el proceso GTAW. [7]

Tabla 2.1. Comparación de los gases de protección empleados en el proceso de soldadura GTAW.

Características	Argón	Helio	Mezcla Argón-Helio
Velocidad de avance	Velocidad de avance reducidas	Velocidad de avance más rápidas	Velocidad de avance mejorada por encima del 100% de Argón.
Penetración	Penetración reducida	Mayor penetración	Penetración mejorada por encima del 100% de Argón.
Limpieza	Excelente acción de limpieza	Menor acción de limpieza	Propiedades de limpieza semejantes a la del Argón.
Arranque de arco	Arranque de arco más fácil	Arranque de arco más difícil	Arco mejorado a partir de 100% de helio
Estabilidad de arco	Buena estabilidad de arco	Menos estabilidad de bajo amperaje	Estabilidad de arco mejorada sobre 100% de helio.
Longitud de arco	Longitud de arco enfocado	Longitud de arco acampanado	Longitud de arco más enfocado que con helio.
Voltaje de arco	Voltaje arco más bajo	Voltaje de arco más alto	Voltaje de arco entre 100% Argón y Helio.
Tasa de flujo	Tasas de flujo más bajas	Caudales más altos	Caudales más alto que el Argón
Costo	Menor costo y mayor disponibilidad	Costo más alto que el Argón	Costo mayor al del Argón.

2.5 Descripción de la soldadura manual

En GTAW para realizar una soldadura manual se debe considerar ciertos aspectos de acuerdo con el tipo de máquina que se usará para realizar el proceso.

2.5.1 Técnicas en la soldadura manual

Para convertirse en experto en la soldadura manual en GTAW, el soldador debe desarrollar habilidades en el manejo de la antorcha con una mano mientras que este controla la corriente de suelda con el pedal de pie o con el control para dedo (usando el pulgar) y a su vez mantener alimentando el metal de aporte con la otra mano. Antes de empezar a soldar cualquier elemento, es necesario tener una clara idea de las variables de operación que se requerirá para el desarrollo del proceso como tales como material de aporte, corriente, gas de protección, etc.

2.5.2 Métodos para Arrancar el Arco

En GTAW se puede arrancar el arco tocando la superficie de la pieza de trabajo con el electrodo, por la superposición de alta frecuencia o por un pulso de voltaje. Sin embargo, en trabajos críticos no se recomienda aplicar esta técnica debido a que hay una mayor probabilidad de presentarse contaminación por tungsteno.

La mayoría de las fuentes de poder en este proceso comprende de un generador de alta frecuencia (regularmente un oscilador de chispa) el mismo que impone alta frecuencia sobre el circuito principal de poder. Cuando se esté soldando con DC ya sea electrodo negativo o positivo, el switch de alta frecuencia (HF) debe hallarse en posición de arranque (start). El soldador debe mantener presionado el pedal de pie, activando un temporizador (timer) por la alta frecuencia iniciando así el arco [8]. Una vez iniciado, el arco se mantendrá después de que pare la alta frecuencia, el suficiente tiempo como para que la energía y la longitud del arco sean adecuadas.

Al realizar el proceso de soldadura con AC, el switch HF debe situarse en posición continua para asegurar la reanudación del arco después de la inversión del voltaje en cada medio ciclo. Los generadores de alta frecuencia en las soldadoras generan frecuencia en el rango de las radiocomunicaciones. En virtud de ello, los fabricantes de las fuentes de poder deben certificar que la radiación de radiofrecuencia desde la fuente de poder no supere los límites establecidos por la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) [7]. La radiación permitida en ocasiones puede causar daños en determinados sistemas de computación, microprocesadores y comunicación. Este tipo de interferencias deben ser indagadas antes de que el arrancador de alta frecuencia sea empleado. Las instrucciones de instalación

obtenidas con la fuente de poder deben ser revisadas y continuar con un riguroso análisis a la alta frecuencia.

El arranque del arco puede ser ejecutado con el pulso de un alto voltaje en un rango de 2 a 3 KV para una duración de pocos milisegundos. El voltaje debe ser alto lo suficiente para saltar el espacio existente entre el electrodo y la pieza, así como su duración debe ser suficientemente larga para permitir que la corriente principal de la soldadura empiece a fluir. El arco piloto entre el electrodo y un electrodo auxiliar en la antorcha, el cual puede ser en forma de anillo [4], ocasionará que el arco se mantenga estable entre el electrodo principal y la pieza.

Para los dos métodos de arranque se necesita de una fuente de poder especial la cual es directamente suministrada con la fuente de poder principal. El sistema de arranque de alto voltaje solicita de una fuente de alto voltaje, el mismo que se encarga de la carga de condensadores y de la descarga de estos por medio del espaciado del electrodo. El método de arco piloto necesita de un voltaje bajo auxiliar, fuente de baja corriente, así como de una antorcha especial que contenga al electrodo auxiliar. Las fuentes de poder de estos sistemas son muy pocos conocidos dentro de la industria de la soldadura, siendo usados en aplicaciones automáticas. [4]

2.5.3 Gas de Respaldo, Remolque Protector y Cámaras de Atmósfera

Los metales y aleaciones al soldar son propensos a la contaminación proveniente de la atmósfera, por lo cual es necesario proporcionar una adecuada protección a toda la zona de soldadura con el gas de protección. Siendo aplicado en aleaciones de metales reactivos como: el titanio, aluminio, circonio y determinadas aleaciones de níquel; y materiales refractarios, como: el columbio, el tantalio entre otros [21]. El gas inerte proporcionado no suministra una protección adecuada para la soldadura, por lo cual, se debe proteger la superficie y la raíz de los contaminantes del área de trabajo hasta que se haya logrado un adecuado enfriamiento en dichas zonas.

Se puede proteger la raíz de una mejor manera usando una barra ranurada de respaldo. En la figura 2.8 se puede visualizar como el gas de protección es introducido a lo largo de toda la ranura a través de una serie de pequeños orificios. Debido al espacio pequeño el caudal a usar en la barra de respaldo debe ser parcialmente bajo, llegando a un valor aproximado de 5 pies³/h. [21]

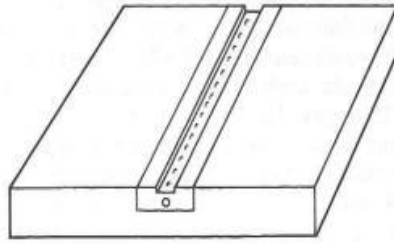


Figura 2.8. Ranura de respaldo con orificios. [21]

Para una mayor cobertura del gas se utiliza un remolque protector, el cual suministra el gas a lo largo de toda la superficie de soldadura mientras este es enfriado. En la figura 2.9 se indica la estructura del remolque el cual consta de una sección tipo canal, abierta en el fondo, cerrada en ambos extremos, con un extremo unido y anclado a la antorcha.

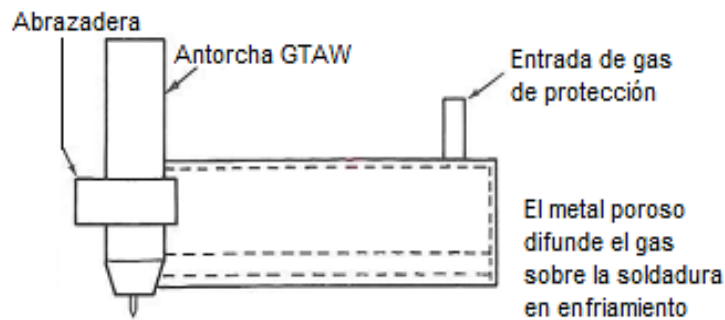


Figura 2.9. Metal poroso dentro de un remolque protector. [21]

Se puede introducir el gas por la parte superior o ya sea por el extremo opuesto de la antorcha. En el interior del remolque se puede ajustar un bloque de material poroso o un bloque de algunas capas de mallas de un alambre fino por encima del canal. El bloque tiene como finalidad formar un flujo uniforme de gas para cubrir toda la zona caliente de la soldadura hasta llegar a punto de enfriamiento donde la superficie no presente óxido o contaminación del aire circundante una vez que haya pasado el remolque.

El tamaño de la soldadura como el calor de entrada y la velocidad de avance son factores de los que depende la longitud y el ancho del remolque protector. Con respecto a la soldadura manual en donde se usa una velocidad de avance y energía parcialmente bajas, se puede adaptar un remolque corto y lo suficientemente ancho para mantener la cobertura, en caso de que la antorcha sea girada por el soldador hacia otro lado. En aplicaciones de soldadura automática, por lo contrario, es necesario un remolque protector más largo dado que las velocidades y la energía de entrada son relativamente más altas. El caudal en el remolque protector puede ser similar o mayor al caudal en antorcha, llegando a un rango que oscila entre los 20-50 pies³/h [20]. Los remolques protectores se pueden ajustar a

juntas cilíndricas o circulares curvándolos.

Al efectuar el proceso de soldadura dentro de una cámara o gaveta se puede obtener una mejor pureza de la atmósfera con gas inerte. Todo el equipo para usar en el proceso como las piezas a soldar, instrumentos, antorcha y el material de aporte son colocados dentro de la cámara, a la cual se le realiza un vaciado para después ser rellenada con el gas. Se depura la cámara usando argón, aunque se puede utilizar otro gas inerte, hasta conseguir una reducción aceptable de oxígeno y nitrógeno; se consume un total de gas de hasta ocho veces el volumen de la cámara.

La pureza requerida y la capacidad del sistema de bombeo son factores de los que dependerá el nivel de evacuación de la cámara. Aquí se puede usar una bomba mecánica que es capaz de evacuar de 10 a 12 micrones (1×10^{-2} torr) o una bomba de difusión siendo capaz de evacuar a 0.1 micrón (1×10^{-4} torr). [10]

Las puertas de la gaveta son cubiertas con placas a lo largo de la evacuación, de esta forma se busca evitar que la gaveta sea empujada en el interior de la cámara y rota a causa de tal impacto. El espacio existente entre la gaveta y las placas de protección de la puerta deben tener una conexión directa a la cámara principal a través de un tubo, de tal forma que se llegue a un equilibrio de presión. Una válvula es requerida para cerrar el tubo para luego de que el sistema es llenado con el gas inerte y antes de que las placas de protección de la puerta sean removidas. La presión al interior de la cámara debe ser correctamente ajustada. Esta presión en el interior de la cámara debería ser acoplada de tal forma que la gaveta ejerza una fuerza hacia afuera, pero suspendido flexiblemente. La pureza del gas en el interior de una cámara puede ser comprobada a través de la aplicación del proceso de soldadura en una pieza de titanio para después analizar la superficie obtenida. Este debe presentar un color metálico brillante sin coloración. Al apreciar un leve color bronce indica que este posee un pequeño porcentaje de aire, por otro lado, el cambio de color azul claro a oscuro refleja el creciente nivel de contaminación. Al presenciar un óxido blanquizco refleja un elevado nivel de contaminación del aire. [10]

Las gavetas y sus puertas son esenciales en la cámara de soldadura aun si la soldadura a realizar es de forma automática. Después de que todos los componentes sean instalados en la cámara y esta sea llenada con el gas inerte, será importante cargar y descargar instalaciones, alinear la junta, cambiar los electrodos adicionalmente el operador realizará diferente ajustes en el caso que sea necesario, este debe estar completamente capacitado para manipular con sus manos en el interior de la cámara.

Las gavetas y sus puertas son esenciales en la cámara de soldadura aun si la soldadura a realizar es de forma automática. Después de que todos los componentes sean instalados en la cámara y esta sea llenada con el gas inerte, será importante cargar y descargar instalaciones, alinear la junta, cambiar los electrodos adicionalmente el operador realizará diferente ajustes en el caso que sea necesario, este debe estar completamente capacitado para manipular con sus manos en el interior de la cámara.

2.6 Descripción de la soldadura automática

En GTAW para realizar una soldadura manual se debe considerar ciertos aspectos de acuerdo con el tipo de máquina que se usará para realizar el proceso.

2.6.1 Técnicas en la soldadura automática

En soldaduras automáticas o manual en GTAW, se monta a la antorcha en un sujetador y por medio de un mecanismo se provee el movimiento de ésta con respecto a la pieza de trabajo.

2.6.1.1 Soldadura a Máquina Básica

Esta técnica se presenta en su modo más simple, en donde la antorcha es montada en un carro móvil mientras que sus componentes son montados en un dispositivo en posición fija. Donde la junta es correctamente alineada con la antorcha y esta es acoplada para obtener una adecuada longitud de arco.

Una vez de haber dado por iniciado al arco, así como el proceso de soldadura, puede ser requerido un ajuste adicional en los parámetros de longitud del arco, así como del alineamiento con la junta siendo factores esenciales. En el caso de juntas cilíndricas, se fija a la antorcha y se rodea al metal y componentes en la parte inferior del arco.

Al añadir al alambre de aporte se lo realiza a través del empleo del sistema de alimentación de alambre en frío. La guía del alambre debe ser acoplada para que ésta alimente al alambre en la parte frontal de la piletta de soldadura, otro factor a considerar es la tasa de alimentación sujetándolo de tal forma que el alambre sea fundido en la piletta de soldadura sin provocar en éste el congelamiento. [23]

2.6.1.2 Establecimiento de Parámetros en la Soldadura Automática.

Al trabajar con el electrodo de tungsteno se debe considerar los siguientes parámetros en el proceso, como la configuración de la punta, rango de corriente, gas inerte, caudal y velocidad de avance lo cuales deben ser determinados y ajustados de acuerdo con las especificaciones del procedimiento y propiedades del metal base a ser soldado. En el caso en el que las especificaciones del procedimiento para la pieza trabajo no existan, los parámetros pueden ser realizados de forma experimental, iniciando con datos a través de fuentes bibliográficas de manuales y otras fuentes publicadas referentes al material estudiado.

Por lo común, los factores que deben ser tomados en consideración para el proceso automático en la soldadura GTAW es la corriente, voltaje, gas de protección, diseño de la junta, preparación de la junta y alambre de aporte. Las diferencias existentes en la soldadura GTAW manual y máquina/automática radica en la velocidad de avance, corriente, así como en la tasa de alimentación que en determinadas ocasiones pueden ser superiores en la soldadura máquina/automática. El uso del remolque protector para el proceso de soldadura con máquina o automática es indispensable la trabajar con corrientes y velocidades altas ya que el depósito de soldadura se mantendrá lo suficiente caliente para oxidarse una vez que pase la antorcha, el remolque protector es recomendado para todos los materiales. Al trabajar con metales reactivos y refractarios tal como el titanio y columbio es necesario el uso del remolque protector, por otro lado, al referirse a aleaciones a base de níquel y cobalto el empleo del remolque protector viene a ser indispensable debido a que estos metales necesitan de una protección extra por su fragilidad al ser sometidos a altas temperaturas. [20]

2.6.1.3 Control de Velocidad de Avance

El control de velocidad de avance en la soldadura a máquina es aplicado, a través del mecanismo de avance el cual debe añadir un control de velocidad el mismo que al ser ubicado, es capaz de proporcionar una velocidad uniforme en el rango de arreglo ajustable. Los controles de velocidad con realimentación electrónica usan un motor eléctrico DC, así como una caja de velocidades para suministrar el rango de velocidad precisa. Los controles pueden utilizar el voltaje de armadura a partir del motor o un voltaje adicional. Este voltaje es equilibrado con el voltaje referencial ajustado en el controlador el cual se adapta a la corriente del motor para conservar la velocidad requerida. [19]

El movimiento relativo puede ser obtenido teniendo los componentes montados en posición fija y la antorcha montada sobre un tractor móvil o carro al lado de una viga el cual mueve

la antorcha a lo largo de la junta. Este es el arreglo preferido para juntas largas. Para juntas cortas los componentes pueden ser montados sobre un carro móvil y la antorcha montada a un soporte fijo pero ajustable. El montaje fijo de la antorcha puede también ser usado para soldadura de juntas cilíndricas donde la parte es rotada bajo la antorcha. El mismo tipo de transmisión con motor DC y control de velocidad electrónico debe ser usado para el movimiento rotacional.

2.6.1.4 Control de Velocidad de Alimentación de Alambre

Para el proceso GTAW el rango de la tasa de alimentación de alambre frío tiene una proximidad de una décima la cual representa una parte de la empleada para la alimentación de alambre en el proceso GMAW. Los rodillos de tracción son uno de los principales componentes del sistema de alimentación de alambre, estos son impulsados a través de un motor con una caja de velocidad, tubo de salida de alambre, boquilla guía del alambre y sujetador de la bobina de alambre. Estos componentes son semejantes a aquellos que son utilizados en el proceso GMAW, excluyendo a la tasa de alimentación ya que esta viene a ser más baja, tampoco es necesario el contacto eléctrico al alambre. Para compensar esto es necesario el uso de una boquilla de salida del alambre ajustable, de esta forma permite que el alambre sea posicionado en una correcta posición en la piletta de soldadura.

Los alimentadores de alambre en su mayor parte lo hacen con una tasa de alimentación constante; no obstante, unos pocos son disponibles con alimentación con un menor incremento, esto ayuda a avanzar y parar o ya sea para parar, avanzar o disminuir para aparentar la acción de una soldadura manual, generando la alimentación del alambre con pequeños golpecitos. Para este tipo de alimentadores de alambre es necesario un control diseñado especialmente para permitir el establecimiento de la velocidad de avance y tiempo, velocidad de disminución y tiempo. [7]

A través de la unidad de control de microprocesador se puede llegar a la obtención de esta acción, la misma que da inicio al impulso del motor en dirección inversa dos veces en cada aumento de alambre. Otras de las técnicas utilizadas es el uso de dos motores los cuales son conectados mediante un engranaje diferencial fijo.

En el caso del primer motor da inicio al movimiento con una velocidad constante en la dirección de avance, al contrario, el otro se pone en movimiento intermitente en la dirección opuesta para producir una reducción neta del alambre. La acción de borde es netamente

útil en la construcción de reborde hacia arriba de componentes delgados en los cuales la alimentación continua del alambre crea un excesivo desbordamiento.

2.6.1.5 Control de Voltaje de Arco (Longitud de Arco)

El voltaje de soldadura o arco son directamente proporcionales al gas de protección, así como la distancia existente entre la punta de electrodo y la pieza de trabajo. En donde al ser un proceso de soldadura manual la distancia entre estos dos, la longitud de arco será manejada por el operador. Por otro lado, al ser el proceso automático la longitud de arco es predeterminada por la distancia existente entre la punta del electrodo hasta la pieza de trabajo. Una de las ventajas que presenta el proceso de soldadura automático es que mediante la aplicación de controladores de voltaje de arco los mismo que permitirán el correcto movimiento de la punta del electrodo hacia arriba y abajo de forma que se logra mantener estable la longitud de arco. [24]

El gas de protección a utilizar incide directamente sobre el voltaje del arco. En donde el helio proporcionará voltajes de arco mayores en relación con el voltaje de arco establecido por el argón, lo que demuestra que el helio posee mayor capacidad de penetración.

La longitud de arco presenta una relación directa sobre el voltaje de soldadura, es decir que al incrementar la longitud de arco se incrementa el voltaje, al tener un voltaje de soldadura muy excesivo el arco también tenderá a serlo, esta condición provocará un cordón de soldadura irregular, así como una baja penetración. Al trabajar con la longitud de arco excesivamente alta, el gas de protección puede no proporcionar una suficiente protección lo que tiende a ocasionar la creación de poros y un cordón de soldadura descolorido. En la figura 2.10 se indican los diferentes efectos de la longitud de arco excesiva.

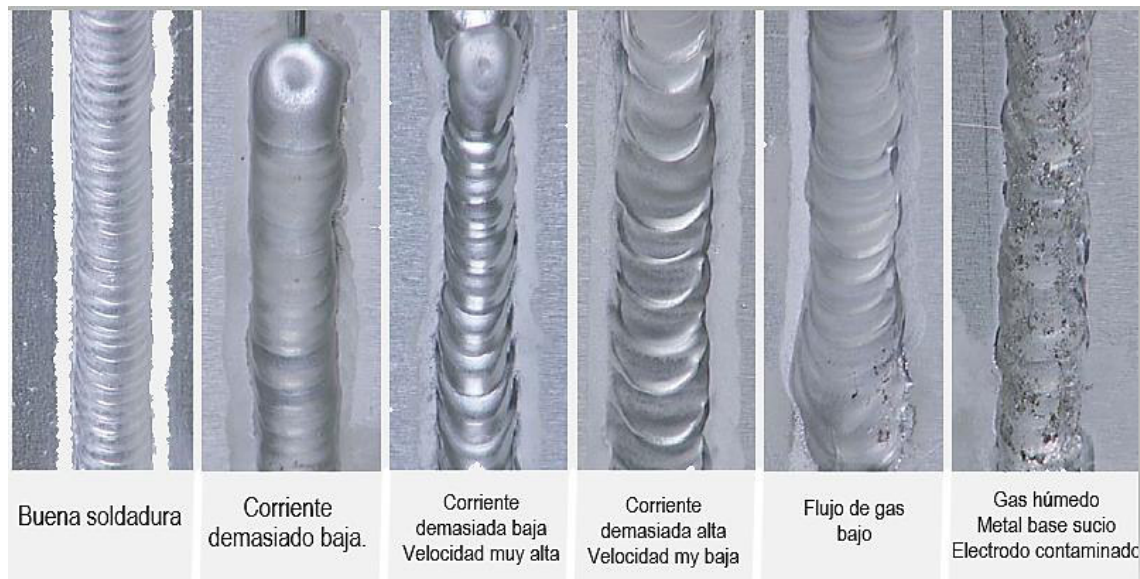


Figura 2.10. Efectos de la longitud de arco excesiva. [20]

Una longitud de arco demasiado corta también puede causar problemas. Aumenta el peligro de contaminación del electrodo porque es más probable que el soldador sumerja el extremo del electrodo en la pileta de soldadura. Otro problema es que se acumula más calor en el electrodo de tungsteno y en la copa del soplete porque están más cerca de la pileta de soldadura. Esto reduce la vida útil del electrodo.

Las unidades de control más avanzadas son capaces de controlar al voltaje de arco en un rango de 0.1 voltios y emplean circuitos que reaccionan de forma rápida ante cambio en la longitud de arco, pero soporta la sobrecarga.

Los motores de imán se mantienen en DC y motores de paso son utilizados en este tipo de controladores. Motores de imán permanente DC y motores de paso son usados en estos controles.

2.6.1.6 Programadores de Soldadura

Los programadores de soldadura pueden alcanzar a controlar todas las funciones paramétricas en el trabajo de la soldadura GTAW: corriente de arco, voltaje, velocidad de avance, tasa de alimentación del alambre y flujo de gas. El microprocesador puede variar a estos parámetros a lo largo de las juntas en el que el espesor, así como otros de los factores requieren de un cambio. En el proceso GTAW la mayoría de las fuentes de poder modernas usadas, son capaces de mantener la corriente de forma controlada mediante un controlador externo o microprocesador. Los voltajes que son impuestos como referencia

para el control del voltaje del arco, velocidad de avance y tasa de alimentación de alambre son proporcionados a través del microprocesador y alimentado en el interior de la unidad de control respectivamente para cada una de las funciones destinadas [23]. Al operar una variedad de aplicaciones en el proceso de soldadura GTAW automático, existen varias máquinas de soldar las mismas que pueden ser diseñadas y construidas según el requerimiento del trabajo.

La máquina GTAW puede ser diseñada para admitir partes a partir de un sistema de transportador, armado de ellas, revisar el ensamble, efectuar las soldaduras necesarias, por lo tanto, evacuar en el interior de un depósito o cualquier otro sistema transportador. Varias soldaduras pueden ser efectuadas sobre cualquiera de las partes de forma simultánea o en efecto utilizando una fuente de poder y controles de soldadura múltiple o simple.

Varias de las máquinas de soldadura son diseñadas por cuantiosas compañías para un propósito en especial.

Usualmente todos los accesorios son considerados al momento de construir estas máquinas con el fin de ejecutar la soldadura requerida (fuentes de poder, unidad de control, alimentador de alambre, antorcha y mecanismos de avances del trabajo, etc.) o pueden añadir algún otro equipo existente.

Previo al diseño y construcción de una máquina de soldar, el proceso y aplicación debe existir un estudio completo, así como desarrollo de pruebas de las sueldas de esta forma se está asegurando que el proceso de soldadura y la técnica operan satisfactoriamente.

En ocasiones, una pequeña modificación en la configuración de la junta puede reducir el trabajo o aumentar el potencial para la obtención de buenas soldaduras, esto debe ser tomado en cuenta siempre que se diseña un sistema de soldadura automática. [10]

2.6.1.7 Corriente Pulsante, Alimentación de Alambre Pulsante

La corriente pulsante en el proceso de soldadura GTAW suministra una profunda penetración y una más de gran tamaño razón penetración- ancho que la soldadura GTAW continúa con el mismo valor de calor de entrada.

La pulsación resulta más efectiva a cantidades de pulso bajas tales como un pulso por segundo y amplitudes de pulso altas. Una de las principales ventajas es que la más grande pulsación está en láminas delgadas, cordones de raíz y construcciones de reborde delegado. La pulsación también disminuye el necesario nivel de formación del operador para trabajos críticos. En láminas delgadas y cordones de raíz, una alta corriente y una duración corta del pulso de corriente puede conseguir de forma satisfactoria una penetración completa, pero la fusión exclusiva y goteo es impedido debido a que la corriente desciende rápidamente hasta lograr un valor determinado al final del pulso. [21]

En el modo corriente pulsante, el calor de soldadura es empleado de forma rápida a la junta lo que ocasiona una pequeña área local a fundirse. En el caso en el que una corriente fuera aplicada de forma continua, una desmedida fusión puede producirse a no ser que la velocidad de avance sea aumentada significativamente. Con altas velocidades de avance, el material fundido en la junta posee una tendencia a hacerse bolas a lo largo de ambos fillos en lugar de seguir uniendo.

La técnica de la corriente pulsante disminuye el corriente previo que la pileta de soldadura de modo que la corriente pulsante, al ser combinada con un alimentador de alambre pulsante, optimiza la construcción con soldaduras de borde como por ejemplo los sellos rotatorios en las tuberías de gas. Esta técnica imita la técnica manual en el cual el operador mueve la antorcha de adelante hacia atrás agregando al material de aporte con pequeños incrementos o golpecitos.

El proceso automático, con alimentación de alambre y corriente pulsante, dota de un mejor control, así como de un depósito más uniforme en comparación al proceso desarrollado por los soldadores manuales más capacitados. En el momento en que se usa una corriente y tasa de alimentación de alambre continuo, tiende a crearse un rollo en el depósito volviéndose más grueso en donde se debe construir un borde fino. Cuando la corriente y la alimentación de alambre son pulsantes, existe la necesidad de que ambos sean sincronizados mutuamente. Tanto el pulso de una alta corriente como el pulso de alimentación, ambos deben coincidir para fundir el aporte que fue agregado al borde. Cuando cae la corriente esta permite que el depósito se solidifique ante que el ciclo se repita.

2.6.1.8 Instalación, Protección de Respaldo

La instalación para GTAW automática debe ser diseñada y construida para trabajos específicos.

Algunos principios generales por considerar son:

1. La instalación debe ser lo suficientemente rígida para sujetar los componentes en su lugar sin movimiento o distorsión cuando la suelda es realizada pero no debe ser muy pesada.
2. La instalación debe ser hecha de un material no magnético, como latón, aluminio o cobre. Las instalaciones pueden ser hechas de algunos materiales diferentes para utilizar las propiedades de cada uno de ellos. Si se utiliza cobre para enfriar, este debe ser niquelado donde se contacta con el trabajo para prevenir la entrega del cobre. Esto es importante cuando se está soldando aleaciones de base de cobalto donde la penetración intergranular del cobre puede ocurrir.
3. Las partes que se sujetan de las instalaciones deben ser diseñadas para una rápida operación tal que se pueda obtener con la acción de una palanca acodillada. Los sujetadores de acción directa hidráulicos de aire pueden ser usados en soldadura a máquina o totalmente automáticas.
4. La instalación debe proveer la protección de respaldo con gas inerte para todas las sueldas. Las barras de respaldo para cada suelda deben tener una ranura de salida centrada bajo la junta y esta debe ser conectada a la fuente abastecedora del gas inerte. La parte superior de las sueldas será protegida con gas inerte de la antorcha y del remolque protector, pero la instalación puede incluir deflectores a lo largo de la junta para ayudar a mantener el gas inerte sobre la suelda que está enfriándose y reducir las corrientes de aire.

2.6.1.9 Protección Auxiliar

Para soldadura a máquina y automática donde las velocidades son altas, es importante que la protección del gas inerte sea proveída sobre la superficie superior de la suelda mientras está enfriándose. Este puede ser proveído por un remolque protector o cámara

de atmósfera controlada. El remolque protector en combinación con una protección de respaldo proveerá una protección adecuada para la mayoría de los materiales y aplicaciones y es mucho menos costoso que la cámara de atmósfera controlada. Las aleaciones de titanio pueden ser soldadas con un remolque protector con ajuste estrecho adecuadamente diseñado.

Los sellos flexibles a lo largo del filo del fondo del remolque protector ayudan a prevenir que el aire entre al área de la soldadura cuando ésta se encuentra todavía caliente. Las aleaciones de circonio, columbio y tantalio son más sensibles a pequeños montos de contaminación de la atmósfera, y estos deben ser soldados en una cámara al vacío llena de argón o helio grado soldadura. [10]

Antes de soldar con remolque y gas de protección o en una cámara, una prueba de soldadura debe ser realizada para examinar cualquier signo de contaminación como evidencia por coloración de la superficie.

3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

Al aplicar el proceso GTAW en aceros al carbono, así como en aceros inoxidable, resulta de mucha importancia la elección del material de aporte, este evitará la formación de imperfecciones en el material de trabajo. El uso de alcohol y acetona los cuales ayudarán a la eliminación de todas las impurezas presentes en la superficie previo a la soldadura.

Esta sección detalla las diferentes técnicas y características que deben ser tomadas en cuenta al momento de aplicar el proceso de soldadura en materiales como el acero al carbono, aleados, aceros inoxidable y aleaciones ferrosas. Sin embargo, estos parámetros deben ser considerados al soldar.

3.2. Aceros comunes al Carbono

El porcentaje de los elementos aleantes que conforman este grupo de aceros se encuentran como máximo 1.0% de C, 1.65% de Mn y el contenido máximo de Si que puede alcanzar es del 0.60%, elemento el cual proporciona durabilidad al material por otro lado el manganeso incrementa la templabilidad ^(a), y el silicio actúa como desoxidante. Al adicionar aluminio a esta aleación este también actuaría como un desoxidante extra.

El amperaje utilizado en la aplicación del proceso de soldadura GTAW depende del tipo de junta que sea aplicado, es por ello por lo que se recomienda el rango de amperaje en la tabla 3.1, estos parámetros son aplicables para todos los grupos de aceros.

Tabla 3.1. Parámetros operativos para aceros al carbono y aceros de bajo contenido de carbono.

Tipo de material	Espesor	Tipo de corriente	Amperaje	Electrodo	Gas protector
Carbono simple y aceros de baja aleación	Todos	DCEN	40-180	Toriado	Argón, Argón-Helio

Los aceros se clasifican de acuerdo con su contenido de carbono, como se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Clasificación de los aceros al carbono

Clasificación de aceros	% de carbono
Aceros al carbono	Hasta 0.15%
Aceros suaves al carbono	Entre 0.15 y 0.29%
Aceros de mediano contenido de carbono	Entre 0.30 a 0.50%
Aceros de alto contenido de carbono	Entre 0.50 a 1%

Soldabilidad ^(b) la templabilidad del acero es una de las propiedades fundamentales. La soldadura tanto en aceros al carbono como en aceros de alto, mediano y bajo contenido de carbono, dependerá del contenido de carbono y de los elementos aleantes, en donde el incremento de la templabilidad proporcionará una máxima dureza.

Al referirse de la zona afectada por el calor de soldadura, zona HAZ, así como la zona de fusión, son zonas que presentan un rápido proceso enfriamiento y calentamiento, generalmente tendrán un enfriamiento acelerado para alcanzar la fase martensítica. La fase martensítica al poseer un alto contenido de carbono aumenta su dureza y presenta una baja ductilidad, factores que pueden crear la formación de agrietamientos a lo largo de la soldadura. La aplicación de un adecuado precalentamiento y el uso de elevadas entradas de energía, son formas para disminuir la tasa de enfriamiento esto se realiza con la finalidad de evitar la formación de la fase martensítica en el proceso de soldadura.

3.2.1. Aceros de bajo carbono

Al hablar de los aceros al carbono y aceros de baja aleación, se debe considerar que estos metales presentan una susceptibilidad ante el hidrógeno presente en la atmósfera, lo que incita a la formación de agrietamientos, estas se van haciendo más susceptibles ante el aumento del carbono, así como del aumento del espesor del metal base.

El resultado de las uniones soldadas tras la aplicación de los parámetros aproximados descritos en las tablas, se crea una excelente plasticidad, así como la excelente resistencia ante el impacto, en este caso la aplicación del proceso de precalentamiento no es necesario, tampoco es necesario la aplicación de tratamiento térmico. Existen varias formas de provisión en los aceros de bajo carbono: efervescente^(a) semicalmado^(b) o calmado^(c), en estos grupos de aceros no es necesario el proceso de precalentamiento, los cuales poseen una estructura

la cual hace que sea fácil la aplicación del proceso de soldadura. Al no presentar la propiedad de desoxidación en el grupo de los aceros efervescentes se tiende a formar porosidades a lo largo del cordón de soldadura, por lo que para evitar esta formación es necesario el uso del material de aporte que posea este desoxidante.

3.2.3. Aceros de medio contenido

Por otro lado, los aceros de medio contenido de carbono son metales que son muy fáciles de soldar, generalmente pueden ser soldados con el proceso GTAW, sin la aplicación de ningún tipo de precalentamiento, pero al no utilizar este, se debe seguir un correcto procedimiento de soldadura, una de las técnicas es el uso adecuado del electrodo el mismo que debe ser bajo en hidrógeno y de medio contenido de carbono. En la tabla 3.3 se indica una aproximación de los parámetros para soldar este grupo de aceros.

Tabla 3.3. Parámetros aproximados para soldar aceros simples, media y bajo contenido de carbono en juntas a tope en posición plana, juntas solapadas y filetes horizontales

Espesor del Material, pulg (mm)	1/16 (1.6)	3/32 (2.4)	1/8 (3.2)	3/16 (4.8)	1/4 (6.4)	1/2 (12.7)
Diámetro del Electrodo, pulg (mm)	1/16 (1.6)	1/16 (1.6)	1/16 (1.6)	3/32 (2.4)	1/8 (3.2)	1/8 (3.2)
Angulo del Electrodo⁽¹⁾	300°	30°	45°	45°	60°	90°
Diámetro⁽¹⁾ de la punta del Electrodo pulg (mm)	0.03 (0.8)	0.03 (0.8)	0.045 (1.1)	0.045 (1.1)	0.045 (1.1)	0.060 (1.5)
Corriente del Arco, Amperios	100-140	100-160	120-200	150-250	150-250	150-300
Voltaje del Arco, Voltios	12	12	12	12	12	12
Diámetro del Alambre, pulg (mm)	1/16 (1.6)	1/16 (1.6)	1/16 (1.6)	3/32 (2.4)	1/8 (3.2)	1/8 (3.2)
Velocidad de Avance, ipm (mm/seg.)	10 (4.2)	10 (4.2)	10 (4.2)	8 (3.4)	8 (3.4)	8 (3.4)
Diámetro de la Copa, pulg (mm)	3/8 (9.5)	3/8 (9.5)	3/8 (9.5)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)	1/2 (12.7)
Caudal de Gas, cfh (l/min)	20 (9.4)	20 (9.4)	20 (9.4)	20 (9.4)	25 (11.8)	25 (11.8)

El electrodo debe ser EWTh 2 para ser usado en electrodo negativo

El gas de protección debe ser 100% de argón

El material de aporte debe ser ER70S-3 o de resistencia superior al metal base

Los aceros de bajo carbono no requieren de un precalentamiento sobre los 38°C (100°F); a medida que incrementa el carbono y la aleación el precalentamiento sube hasta 316°C (600°F)

En el grupo de los aceros de mediano carbono, estos cuentan con una mayor templabilidad, en donde usualmente se necesita de un precalentamiento en un rango de temperatura de entre los 204 °C y 315°C, previo al proceso se puede requerir la aplicación de tratamientos térmicos adicionales como el revenido o bien sea un relevo de tensiones.

3.2.3. Aceros de alto contenido de carbono

Previo a la soldadura es necesario que estos sean tratados térmicamente mediante el recocido y una vez finalizado el proceso de soldadura la aplicación de tratamientos térmicos para alcanzar la dureza suficiente del metal la misma que puede alcanzar los 63 HRc. En el caso de la aplicación de la soldadura estos requieren un adecuado proceso en donde el precalentamiento es necesario usando un rango de temperatura entre los 260 °C hasta los 315.55°C, considerando temperaturas de pases entre los 232 °C hasta los 260°C, así como el empleo de del tratamiento de revenido una vez finalizado el soldeo.

La aplicación del proceso de soldadura GTAW es ideal para trabajar con este tipo de aceros debido que estos aceros requieren de una penetración poco profunda, de esta forma se está evitando que el material base y el electrodo se mezclen, por lo cual es necesario trabajar con electrodo negativo con corriente directa (DCEN). Previo a la soldadura es necesario que estos sean tratados térmicamente mediante el recocido, una vez finalizado el proceso de soldadura la aplicación de tratamientos térmicos para alcanzar la dureza suficiente del metal.

La aplicación del proceso de soldadura GTAW no es muy común al referirse al grupo de los aceros, a excepción de aquellos que posean pequeños espesores, los cuales pueden ser usados en aplicaciones como en tuberías y en pases de raíz de materiales con un espesor mayor.

Estos pases de raíz pueden ser aplicados mediante el uso de otros procesos óptimos, entre los más recomendables están el SMAW y FCAW y como último pase se lo realizaría con el proceso GTAW ya que este proporciona pasada con un mayor acabado superficial, se da solamente como una última pasada debido que el proceso GTAW posee baja deposición por lo que resultaría pérdidas económicas significante.

Tras aplicar el pase de raíz en materiales de bajo espesor, se debe considerar la protección de respaldo de la junta mediante argón una mezcla de helio-argón con el fin de evitar la formación de óxido en la superficie hasta alcanzar pases de raíz.

3.3. Aceros de Baja Aleación

Los aceros de baja aleación se dividen en tres grupos, los cuales normalmente poseen un contenido máximo de 6% de elementos aleantes. Según las especificaciones ASTM también son denominados aceros de alta resistencia HSL, los mismo que son destinados a diferentes aplicaciones como en tuberías, chapas metálicas, etc. Entre sus principales aplicaciones está el empleo en edificaciones de estructuras metálicas, tanques de presión, así como en fabricación de puentes, en este tipo de metales se puede aplicar tanto el proceso GTAW como el resto de los procesos de soldadura en donde entre los preferidos están SMAW y FCAW, sin embargo el soldeo de la junta en recipientes de presión y tuberías la mejor opción es el proceso GTAW ya que este posee las características de una mejor penetración, avance lento y mejor acabado superficial.

En estos aceros, los 300°F es la temperatura óptima para precalentamiento, así como la aplicación de procesos de soldadura de bajo hidrógeno. Esta temperatura de precalentamiento dependerá del espesor del acero, mientras mayor este sea la temperatura deberá ser incrementada. En cuanto al metal de aporte sus propiedades deben asemejarse al metal base. En la tabla 3.3 también se especifican los parámetros de soldadura aproximados para este grupo de aceros inoxidables, los cuales pueden ser empleados en este grupo de aceros. Por otro lado, en las tablas 3.4, 3.5 y 3.6 se detalla cada uno de los parámetros de operación según el espesor y el tipo de junta que generalmente son utilizadas en el proceso GTAW.

Tabla 3.4. Parámetros aproximados al trabajar con juntas a tope.

Acero al carbono - Corriente directa - Electrodo toriado					
Espesor de metales (mm)	Diámetro del electrodo (mm)	Diámetro del material de aporte (mm)	Corriente de soldadura (A)	Flujo del gas de protección (l/min)	Gas protector
1.6	1.6	1.6	60 - 70	5	Argón
3.2	1.6 or 2.4	2.4	70 - 95	6	
4.8	2.4	2.4	100 - 130	7	
6.0	3.2	3.3	155 - 175	8	

Tabla 3.5. Parámetros aproximados al trabajar con juntas tipo T

Aceros al carbono- Corriente directa - Electrodo toriado					
Espesor de metales (mm)	Diámetro del electrodo (mm)	Diámetro del material de relleno (mm)	Corriente de soldadura (A)	Flujo del gas de protección (l/min)	Gas protector
1.6	1.6	1.6	50 - 70	5	Argón
3.2	1.6 o 2.4	2.4	90 - 120	5	
4.8	2.4	3.2	135 - 175	6	
6.0	3.2	4.8	170 - 200	7	

Tabla 3.6. Parámetros aproximados al trabajar con juntas tipo esquina.

Aceros al carbono - Corriente directa - Electrodo toriado					
Espesor de metales (mm)	Diámetro del electrodo (mm)	Diámetro del material de relleno (mm)	Corriente de soldadura (A)	Flujo del gas de protección (l/min)	Gas protector
1.6	1.6	1.6	40 - 60	6	Argón
3.2	1.6 o 2.4	2.4	70 - 90	7	
4.8	2.4	3.2	110 - 130	8	
6.0	3.2	4.8	155- 175	10	

En la tabla 3.7 se especifica el material de aporte de acuerdo con el material base, bajo la normativa AWS, tanto para aceros al carbono como de baja aleación.

Tabla 3.7. Metales de aporte para soldadura GTAW de aceros al carbono y de baja aleación.

Aleación Base	Material de Aporte	Especificaciones AWS
A36 A529 A570 A573 A53 A106 A501 A242 A441 A588 A572, Grado 42 A633 Grados A, B, C, D	ER70S-2 ER70S-3 ER70S-6 ER70S-7	A5.18
A572 Grado 60, 65 A633 Grado E A242 A588	ER80S-G ER80S-B2 ER80S-B2L ER80S-Ni1 ER80S-Ni2 ER80S-Ni3	A5.28
A514/A517	ER100S-1 ER110S-1 ER120S-1	A5.28
A533, Grado B	ER100S-1 ER110S-1	A5.28
A537	ER80S-Ni1 ER80S-Ni2 ER80S-Ni3	A5.28
A543, Grado B	ER110S-1 ER120S-1	A5.28
A678, Grado C	ER100S-1	A5.28
HY80 HY100	ER110S-1 ER120S-1	A5.28

Estos materiales de aporte son recomendados para juntas que requieren propiedades del metal base. Otras soldaduras como las soldaduras de filete y de penetración parcial deben usar metales de aporte de menor resistencia.

3.4. Aceros inoxidables

Los aceros inoxidables se caracterizan por su composición a base de hierro en donde llegan a poseer alrededor un 11% de cromo, el cual es el encargado de brindar resistencia ante la corrosión y oxidación debido a que este elemento tiende a crear una capa de óxido.

Al momento de la aplicación de la soldadura en estos aceros es necesario tomar en cuenta varios de los factores como la correcta inclinación del ángulo de la antorcha el cual ronda entre los 10° y 20°, de debe a la baja corriente lo que provoca un charco de soldadura lento a lo largo de la soldadura, al trabajar con esta inclinación del arco sobre todo en materiales de bajo espesor de esta forma el charco de soldadura es más estable o existe un mejor control del mismo. Al emplear el proceso de soldadura con junta a tope la protección de la parte posterior metal base resulta indispensable ya que este tiende a oxidarse por la falta de alcance del gas protector.

En la tabla 3.8 se indican los diferentes parámetros operativos especificando el amperaje, tipo de electrodo, así como el adecuado gas de protección, parámetros que son válidos para todos los grupos de aceros inoxidables.

Tabla 3.8. Parámetros aproximados para aceros inoxidables bajo el proceso GTAW.

Tipo de material	Espesor	Tipo de corriente	Amperaje	Electrodo	Gas protector
Aceros inoxidables	Todos	DCEN	40-180	Toriado	Argón, Helio

3.4.1. Aceros inoxidables austeníticos.

La característica principal de este grupo de aceros inoxidables es su composición de varios elementos aleantes como 18% de cromo, así como un 8% de níquel, para incrementar sus propiedades mecánicas contienen otras pequeñas cantidades de elementos como molibdeno, titanio, columbio y tantalio. Estos pueden mantenerse en fase austenítica a temperatura ambiente y elevadas temperaturas, es un material que se puede distinguir por su excelente tenacidad, soldabilidad y ductilidad.

Poseen un elevado coeficiente de expansión superior al 50% en relación con los aceros al carbono, por lo cual se debe poner más atención en la formación de distorsiones, así como deformaciones.

Lo que conlleva a elevadas tensiones de contracción y por consiguiente la formación de agrietamiento de caliente. Varias son las consideraciones que deben ser aplicadas para reducir estos factores como una menor entrada y calor para alcanzar el punto de fusión y el correcto diseño de juntas las cuales ayudan a disminuir la utilización de los materiales de aporte. Una de las ventajas de poseer esta baja conductividad es que el calor es disperso a mayor velocidad en comparación con los aceros al carbono.

Así como en los aceros al carbono el grupo de aceros inoxidable austeníticos también son sensibles ante la presencia de carburos de cromo en la zona HAZ, la que se produce en rango de temperatura que de los 800° a los 1600°F, lo que disminuye la resistencia a la corrosión.

Una de las soluciones para reducir este problema es la aplicación de bajas entradas de calor al momento del empleo de la soldadura, así como la aminorar el rango de temperatura de sensibilización, utilizando materiales de aporte que posean bajas cantidades de carbono, o ya sea la correcta utilización de aceros inoxidable que posean varios elementos aleantes como el titanio, tantalio y columbio, elementos capaces de reaccionar con el carbono, dejando que el cromo permanezca en esta solución.

En la tabla 3.9 se detallan el tipo del material de aporte según la utilización del material base también el mismo que debe ser seleccionado por el operador al soldar este grupo de aceros inoxidable.

Otros de los problemas se presentan en el proceso de enfriamiento de la soldadura produciendo un agrietamiento al cordón de soldadura, aunque el metal base contenga un 100% de austenita, ya en varias ocasiones a hallado soldadura con depósitos de ferrita en una entre 3 y 10%, los mismos que experimentará una mayor resistencia al agrietamiento en caliente en comparación a los metales de aporte que presentan un 100% de austenita.

El contenido de ferrita presente en este grupo de aceros puede ser inspeccionado con la ayuda del medidor Magne-Gage mediante el proceso de cálculo a partir del diagrama de Schaeffler.

Otros de los problemas se presentan en el proceso de enfriamiento de la soldadura produciendo un agrietamiento al cordón de soldadura, aunque el metal base contenga un 100% de austenita, ya en varias ocasiones a hallado soldadura con depósitos de ferrita en una entre 3 y 10%, los mismos que experimentará una mayor resistencia al agrietamiento en caliente en comparación a los metales de aporte que presentan un 100% de austenita.

El contenido de ferrita presente en este grupo de aceros puede ser inspeccionados con la

ayuda del medidor Magne Gage a mediante el proceso de cálculo a partir del diagrama de Schaeffler, diagrama el cual se muestra en la figura 3.1., el mismo que permite verificar la compatibilidad del electrodo con el material base.

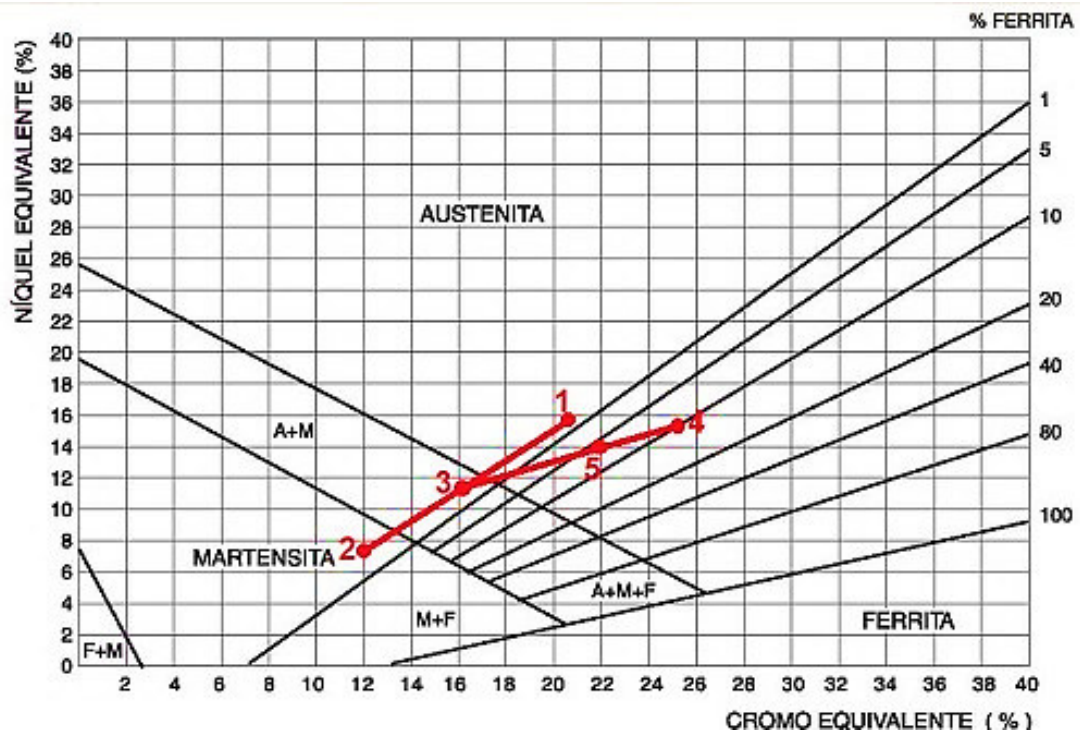


Figura 3.1. Diagrama de Schaeffler. [10]

Mediante el uso de este diagrama se podrá obtener en contenido y estructura del material base y aporte, así como el depósito de soldadura, a partir de ello se conoce la composición de material de base.

Para evitar la formación de la fase sigma la mismo que es causante de disminuir la ductilidad, tenacidad, así como la resistencia a la corrosión se debe considerar las cantidades óptimas y necesarias de ferrita en el proceso de soldadura GTAW.

Tabla 3. 9. Metales de aporte para soldadura GTAW para soldadura GTAW de aceros inoxidable austeníticos.

Aleación Base	Material de Aporte	Especificación AWS
201 202	ER209, ER219 ER308	A5.9
301,302 304,305	ER308	A5.9
304L	ER308L ER347	A5.9
309	ER309	A5.9
309S	ER309L	A5.9
310, 314, 310S	ER310	A5.9
316	ER316	A5.9
316L	ER316L	A5.9
316H	ER16-8-2 ER316H	A5.9
317	ER317	A5.9
317L	ER317L	A5.9
321	ER321	A5.9
330	ER330	A5.9
347, 348	ER347	A5.9
349	ER349	A5.9

3.4.2. Aceros inoxidables ferríticos

Unos de los problemas comunes que se puede encontrar al momento de soldar este tipo de aceros inoxidables es el rápido crecimiento de grano en zona de la soldadura y la reducción de la tenacidad, la ausencia de austenita durante el precalentamiento es la principal de estos factores, por consiguiente, no existe la formación correcta de ferrita lo que provoca la ausencia del refinamiento de los granos. En este caso el precalentamiento no es necesario debido a la ausencia de transformación en donde este tendría a aumento el tamaño del grano.

El material de aporte deberá poseer propiedades semejantes a las del metal base para que exista una mejor adherencia entre juntas, en donde generalmente se emplean metales de aporte austenítico o aleaciones a base de níquel.

El proceso ideal para este grupo de aceros inoxidable es el GTAW, en donde se debe considerar la aplicación de electrodo negativo de corriente directa (DCEN), así como la aplicación del gas de protección en donde puede ser argón, helio o bien sea una mezcla de ambos, para conseguir excelentes resultados tras el empleo del proceso de soldadura.

3.4.3. Aceros inoxidables martensíticos.

Una de las características de este grupo es la facilidad de transformación de fase ferrítica a austenítica durante el precalentamiento, así como la formación de martensita al iniciar el enfriamiento. El porcentaje de carbono juega un papel importante en la dureza del metal de igual forma el porcentaje de cromo ya que este fomentará el endurecimiento considerando un proceso de enfriamiento por medio del aire obteniendo como resultado la una estructura martensítica. La disminución de dureza y tenacidad es provocada tras el alto porcentaje de carbono.

En la tabla 3.10 se detallan los principales parámetros para soldar en las diferentes posiciones descritas en la misma.

Tabla 3.10. Parámetros aproximados para soldar aceros inoxidable en juntas a tope en posición plana, juntas solapadas y filetes horizontales

Espesor del Material, plg (mm)	1/16 (1.6)	3/32 (2.4)	1/8 (3.2)	3/16 (4.8)	1/4 (6.4)	1/2 (12.7)
Diámetro del Electrodo, pulg (mm)	1/16 (1.6)	1/16 (1.6)	1/16 (1.6)	3/32 (2.4)	1/8 (3.2)	1/8 (3.2)
Angulo del Electrodo ⁽¹⁾	300°	30°	45°	45°	60°	90°
Diámetro ⁽¹⁾ de la punta del Electrodo pulg (mm)	0.03 (0.8)	0.03 (0.8)	0.045 (1.1)	0.045 (1.1)	0.045 (1.1)	0.060 (1.5)
Corriente del Arco, Amperios	80 - 120	100 - 130	120 - 150	150 - 250	200 - 350	225 - 375
Voltaje del Arco, Voltios	12	12	12	12	12	12
Diámetro del Alambre, pulg (mm)	1/16 (1.6)	1/16 (1.6)	1/16 (1.6)	3/32 (2.4)	1/8 (3.2)	1/8 (3.2)
Velocidad de Avance, ipm (mm/seg.)	10 (4.2)	10 (4.2)	10 (4.2)	8 (3.4)	8 (3.4)	8 (3.4)
Diámetro de la Copa, pulg (mm)	3/8 (9.5)	3/8 (9.5)	3/8 (9.5)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)	1/2 (12.7)
Caudal de Gas, cfh (l/min)	20 (9.4)	20 (9.4)	20 (9.4)	20 (9.4)	25 (11.8)	25 (11.8)

El electrodo debe ser EWTh2 en donde deben ser aplicados en DCEN

El gas de protección debe ser 100% de argón

Las propiedades del material de aporte deberán ser semejantes al del material base

Los aceros inoxidable ferríticos y austeníticos no necesitan de un precalentamiento, pero los aceros martensíticos se necesitarán, considerando una temperatura de calentamiento hasta los 316 °C dependiendo del contenido de carbono.

En diferentes condiciones de tratamiento térmico en este grupo de acero inoxidable pueden ser soldados, entre ellos están el recocido, templado y revelado de tensiones debido a que la aplicación de estos presenta un minúsculo efecto en la zona de la soldadura, en el temple y como consecuencia en el proceso de soldadura.

Para alcanzar la formación de martensita una vez finalizada la soldadura este debe enfriarse a una temperatura que ronda los 204°C, de igual forma la disminuir la probabilidad de formación de grieta esta debe calentarse a una temperatura de revenido menor a los 204°C. El contenido de carbono será el factor del cual dependerá la temperatura de calentamiento, también pueden influir otros factores como el grosor de la junta, así como el metal de aporte.

El empleo de materiales de aporte del grupo de los aceros inoxidable austeníticos sirve para soldar los aceros martensíticos debido que proporciona una elevada tenacidad, en donde debe tomarse en cuenta la correcta aplicación del tratamiento térmico una vez finalizada la soldadura, debido que estos materiales de aporte ocasionan una resistencia a la tracción.

3.4.4. Aceros inoxidables dúplex

Buena resistencia al picado, ductilidad y alta tenacidad estas son algunas de las propiedades que presenta este grupo de aceros inoxidables. El material de aporte requerido para el acero inoxidable Dúplex debe asemejarse a las propiedades del metal base para que exista una correcta fusión entre ambos, tanto el material de aporte como los parámetros de operación recomendados se detallan en la tabla 3.11.

Una de las principales características que posee este grupo de aceros inoxidables es su composición la cual consta de ferrita y austenita, cada una en un porcentaje de 50%, estos porcentajes pueden variar entre un 20 y 80% de ferrita. Porcentaje de elementos aleantes como un 22 y 26% de cromo, la suma del 2 al 5% de molibdeno, un máximo del 2% de cromo, así como la reducción del porcentaje de níquel hasta un 4%, son las composiciones que son transformadas mediante la composición típica de austenita.

Después de la aplicación del tratamiento térmico en mismo que puede desarrollarse en caliente, se llega a la obtención requerida de la microestructura de ferrita y perlita en un porcentaje igualitario del 50% para ambos casos. Por otro lado, al desarrollarse un procedimiento normal del tratamiento térmico, se debe considerar el siguiente rango de temperaturas de 87.77 y 1148.89 °C insista a la transformación de la ferrita delta a una fase equilibrada de austenita.

El acero inoxidable Dúplex tiende a agrietarse durante el proceso de enfriamiento, esta formación sucede de forma rápida lo que dificulta la aplicación del tratamiento térmico una vez terminado el proceso de soldadura.

El proceso de soldadura GTAW es ideal para la soldadura de aceros dúplex en espesores de $\frac{1}{4}$ o superior, en donde se necesita de la tasa de deposición más elevada en comparación al resto de procesos. La aplicación del metal de aporte es requerida en láminas de pequeños espesores tras el emplear el proceso GTAW.

Se debe tomar en cuenta el control adecuado de la tasa de calor ya que se debe evitar la dilución con la finalidad de alcanzar la cantidad suficiente de austenita a lo largo del proceso.

3.4.5. Aceros inoxidables endurecibles por precipitación

Tres son los grados existentes en este grupo de aceros inoxidables, en donde el mecanismo de envejecimiento es la razón del incremento de su dureza.

En donde el grado martensítico logra el endurecimiento por la reacción existente de la martensita para después ser endurecidos mediante el envejecimiento. La martensita formada en el proceso de enfriamiento es lograda a través de la aplicación de tratamientos térmicos para el grado semi austenítico. El tercer grado conforma el austenítico, en donde al mantenerse en temperatura ambiente este tiende a permanecer de esta forma. Una de las características es que este grupo únicamente logra ser endurecido tras la aplicación del proceso de envejecimiento.

En los grados martensíticos su soldabilidad por lo general resulta de alta calidad, debido a que evita la formación de grietas al ser sometidos a altas temperaturas por su bajo contenido de carbono. No es necesario la aplicación del proceso de precalentamiento ya que gracias a su composición evita la formación de agrietamientos. El proceso de envejecimiento puede ser considerado como un proceso previo a la aplicación de tratamientos térmicos en determinadas secciones que presentan un mayor espesor, así como en piezas de elementos que contienen una alta probabilidad de ser restringidas.

En cuanto al metal base debe mantenerse en la condición de tratamiento por solución, en donde la opción más factible es la aplicación del proceso GTAW en las múltiples pasadas al tener cordones estrechos, de esta forma se impedirá la pérdida de varios elementos aleantes los cuales son necesarios para mantener o incrementar sus propiedades mecánicas en especial su propiedad oxidante encontrada en elementos como el aluminio, titanio y columbio.

En relación con el resto de los grupos de aceros inoxidables estos presentan un mayor nivel de dificultad al aplicar el proceso de soldadura, en donde el material base debe mantenerse en un proceso de tratamiento térmico por solución, la aplicación del proceso GTAW es óptimo para este acero ya que este evita cualquier contacto con la atmósfera evitando la formación de deformidades y agrietamiento en el cordón de soldadura.

En la tabla 3.11 se detalla la correcta elección del metal de aporte según el tipo de material base bajo las especificaciones AWS.

Tabla 3.11. Metales de aporte para soldadura GTAW de aceros inoxidables martensíticos, ferríticos endurecidos por precipitación y dúplex.

Aleación Base	Material de Aporte	Especificaciones AWS
410	ER410	A5.9
410 NiMo	ER410 NiMo	A5.9
420	ER420	A5.9
430	ER430	A5.9
630	ER630	A5.9
16-8-2	ER16-8-2	A5.9
17-4 PH 15-5 PH	AMS 5826 (17-4 PH) o ER 308	A5.9
Aceros W	AMS 5805C (A286) o ER NiMo-3	A5.14
17-7 PH	AMS 5824A(17-7 PH)	
PH15-7Mo	AMS 5812C(PH15-7Mo)	
AM350	AMS 5774-B(AM350)	
AM355	AMS 5780A(AM355)	
A286	ERNiCrFe-6 o ERNiMo-3	A5.14
2205	ER 2209	
255	ER 2553	

En las tablas 3.12, 3.13 y 3.14 se detallan los parámetros operativos de acuerdo al tipo de junta que son utilizadas con mayor frecuencia en metales ferrosos en las diferentes aplicaciones industriales, las cuales dependen de espesor del metal diámetro del electrodo, en donde se especifica el uso del material de relleno según su diámetro, tipo de corriente, el flujo de gas de protección, así como el gas de protección.

Tabla 3.12. Consideraciones de parámetros aproximados para la soldadura en juntas a tope.

Aceros inoxidables - Corriente directa - Electrodo toriado					
Espesor de metales (mm)	Diámetro del electrodo (mm)	Diámetro del material de relleno (mm)	Corriente de soldadura (A)	Flujo del gas de protección (l/min)	Gas protector
1.6	1.6	1.6	60 - 70	5	Argón
3.2	2.4	2.4	70 - 95	6	
4.8	2.4	2.4	100 - 120	7	
6.0	3.2	3.3	135 - 160	8	
<p>Respaldo móvil Hasta 3.2 mm</p> <p>Sin separación de raíz Hasta 3.2 mm</p> <p>65° - 75° 1mm 1.6mm 4.8 mm y mas grueso</p>					

Tabla 3.13. Consideraciones de parámetros aproximados para la soldadura en juntas tipo T.

Aceros al carbono- Corriente directa - Electrodo toriado					
Espesor de metales (mm)	Diámetro del electrodo (mm)	Diámetro del material de relleno (mm)	Corriente de soldadura (A)	Flujo del gas de protección (l/min)	Gas protector
1.6	1.6	1.6	50 - 70	5	Argón
3.2	1.6 o 2.4	2.4	90 - 120	5	
4.8	2.4	3.2	135 - 175	6	
6.0	3.2	4.8	170 - 200	7	
<p>Asegúrese de que la superficie a lo largo de la línea de unión esté libre de óxidos y grasa.</p> <p>Hasta 3.2 mm - sin espacio Más de 4.8 mm - 0.8 mm de separación</p>					

Tabla 3.14. Consideraciones de parámetros aproximados para la soldadura en juntas tipo esquina.

Aceros inoxidables - Corriente directa - Electrodo toriado					
Espesor de metales (mm)	Diámetro del electrodo (mm)	Diámetro del material de relleno (mm)	Corriente de soldadura (A)	Flujo del gas de protección (l/min)	Gas protector
1.6	1.6	1.6	40 - 70	6	Argón
3.2	2.4	2.4	50 - 75	7	
4.8	2.4	3.2	90 - 110	8	
6.0	3.2	4.8	125 - 150	10	

El gas de protección es seleccionado de acuerdo con el espesor y tipo de corriente a utilizar en el proceso de soldadura.

En el proceso de soldadura GTAW se consiguen soldaduras de alta calidad, así como superficies libres de impurezas, en donde la mayoría de los metales estudiados trabaja con corriente DCEN.

En GTAW se obtienen las soldaduras de mayor calidad debido que la zona de soldadura se encuentra protegida por el gas de protección a lo largo de todo el proceso de soldadura, lo general el gas inerte más utilizado es el argón ya que este es fácil de conseguir y su costo es bastante módico.

En la tabla 3.15. Se realiza un pequeño resumen de la forma de la punta del electrodo tanto en pulgadas como en milímetros, así como la correcta posición del ángulo que debe tomar la antorcha en el trayecto de la soldadura.

Tabla 3.15. Formas de la punta del Electrodo

Diámetro del Electrodo		Diámetro de la Punta		Ángulo en Grados °	Electrodo Negativo (DCEN)	
Pulgadas	Milímetros	Pulgadas	Milímetros		Rango, A de Corriente Constante	Rango, A de Corriente Pulsante
0.040	1.02	0.005	0.125	12	2-15	2-15
0.040	1.02	0.010	0.25	20	5-30	5-60
0.062	1.59	0.020	0.5	25	8-50	8-100
0.062	1.59	0.030	0.8	30	10-70	10-140
0.093	2.38	0.030	0.8	35	12-90	12-180
0.093	2.38	0.045	1.1	45	15-150	15-300
0.125	3.18	0.045	1.1	60	20-200	20-300
0.125	3.18	0.060	1.5	90	25-200	25-300

El electrodo debe ser EWTh2 para ser usado en electrodo negativo

El gas de protección debe ser 100% de argón

La composición del material de aporte debe coincidir con la del material base o ser una varilla recomendada para una aleación base específica

Generalmente los aceros inoxidable austeníticos y ferríticos no requieren un precalentamiento. Los aceros inoxidable martensíticos requieren un precalentamiento de 316°C (600°F) dependiendo del contenido de carbón.

Conclusiones

- Una vez finalizado todo el estudio e investigación del proceso GTAW aplicado en materiales ferrosos como en aceros carbono, aceros inoxidable y sus aleaciones ferrosas se llegan a las siguientes conclusiones destacando los aspectos de mayor relevancia:
- Según el primer objetivo se logró estructurar toda la información del proceso GTAW de forma satisfactoria en donde se detalla puntos que van desde la historia hasta los parámetros de operación para cada uno de los materiales estudiados, de esta forma toda la información obtenida es simplificada en donde se optimiza la información precisa sobre el manejo y elección de accesorios, así como de los componentes, los que sirven de guía para la correcta aplicación del proceso al aplicar el proceso de forma manual o automática.
- Una vez realizado el estudio e investigación se determinó las variables de mayor impacto de la soldadura GTAW, variables las cuales son descritas puntualizando el uso de cada una de ellas, centrándose en la elección del gas de protección, selección del electrodo, así como de su punta, el correcto manejo de la antorcha, elección de la corriente y voltaje, la adecuada limpieza del material de trabajo y aporte para evitar la formación de porosidades e imperfecciones, de tal forma que el lector pueda interpretar estos parámetros para posteriormente se aplique el proceso de soldadura ya sea en aceros, aceros inoxidable y sus aleaciones ferrosas.
- De acuerdo con los objetivos planteados se estructuró satisfactoriamente toda la información obtenida en donde se detalla las técnicas y parámetros del proceso llegando a organizar toda la información de manera ordenada de tal forma que todo tenga secuencia para el mejor entendimiento del público en general.
- De este modo se analizó la influencia de todos los parámetros del proceso de soldadura GTAW al ser aplicados en aceros al carbono, aceros inoxidable y aleaciones ferrosas, determinando si cada uno de estos necesitan de un previo precalentamiento y de uso del material de aporte el cual en aceros inoxidable dúplex y endurecibles por precipitación sus propiedades deben asemejarse a las propiedades del material base de tal forma que exista un mayor fusión entre ambos

metales, llegando a la obtención de cordones de alta calidad.

- De acuerdo con los objetivos planteados, la investigación, así como la estructura de la información ha sido exitoso de tal forma que todos los parámetros operativos del proceso GTAW en aceros al carbono, aceros inoxidable y sus aleaciones ferrosas son ordenados en tablas, las mismas que pueden servir de guía al trabajar con este proceso y estos metales ferrosos de tal forma que se llegase a la obtención de cordones de soldadura limpios, evitando la formación de imperfecciones tanto en el cordón como en la superficie del metal base.
- Tras el análisis del presente trabajo se puede decir que la soldadura GTAW aplicada en cada uno de estos metales proporciona excelentes soldaduras, debido a su buena capacidad de penetración debido a que la mayor parte de calor se concentra en el material base siendo un 70%, y el otro 30% se encuentra en la punta del electrodo, en donde este permanece más frío, otras de las cualidad que sobresalen en este proceso de soldadura es la utilización del sistema de alimentación, finalmente la cualidad que evita la disminución de la distorsión del metal es la baja concentración de esfuerzos.

Recomendaciones

- Tras el ordenamiento de los parámetros operativos es recomendable que estos sean utilizados como base para la aplicación de procesos de soldadura de forma experimental.
- Es recomendable usar estos parámetros considerando el precalentamiento al ser necesario, las técnicas adicionales que facilitarán y garantizarán la dureza de los metales, así como la correcta selección de estas tablas al ser aplicados en materiales ferrosos como en aceros al carbono y aceros inoxidable.
- Tras la organización en tablas de los parámetros aproximados para la aplicación del proceso GTAW en los materiales descritos, los cuales son de utilidad para la aplicación de forma experimental para trabajos futuros los mismos que proporcionarán una mejor elección de estos, así como el análisis de calidad de la soldadura por medio ensayos destructivos y no destructivos de cada material, con el objetivo de determinar la calidad de la soldadura y que esta mantenga propiedades mecánicas óptimas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Catálogo No. 3, Proceso TIG, Larry Industrial, Mérida, YUC.
- [2] R-Tech Welding Equipment, Guide to Tig Welding, Tewkesbury, 2009.
- [3] K. Gupta y J. P. Davim, "Comprehensive analysis of gas tungsten arc welding technique for Ni-base weld overlay", en Advance Welding and Deforming, D. Rathod, Elsevier, 2021, pp105-126
- [4] Maquinaria Madrid, El arte de la soldadura, Fuenlabrada, 2016.
- [5] A. Althouse, C. Turnquist y W. Bowditch, Modern Welding, GW-Publisher, 2018
- [6] I. Escudero, Procedimiento TIG, Asturias: CIFP Avilés
- [7] Miller, Guidelines for Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), 215994 F, Illinois, USA, 2018
- [8] CK Worldwide, Technical specifications for Tig welding, 2015
- [9] E. Torres, L. Abraham, Soldabilidad de aceros al carbono de baja, media y alta aleación, Lima, 2014
- [10] M. Echeverría, E. Niñez, Aceros Inoxidables, Chile: Indura S.A., 2010
- [11] Flagg, J. "Gas Tungsten Arc Welding GTAW". USA: Lincoln Arc Welding Foundation. 2004
- [12] K. Thulukkanam, Heat Exchanger Design Handbook, CRC Press, 2013.
- [13] C. Bazán, Determinación de electrodos y cálculo de costos de soldadura al arco asistidos por computadora, Pirhua, 2002.
- [14] D. Gamarra, "Determinación de los parámetros óptimos de la soldadura tig, para tuberías de diámetro estándar de 1" y 4" con especificación técnica astm a270-tipo 304 y evaluación por ensayos no destructivos", tesis pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2020
- [15] BMI Surplus, Jetline Engineering TEG-1A Tungsten Electrode Grinder, 2019
- [16] M. J. Donachie, "Arc Welding", en Titanium: A Technical Guide, ASM International, 2000
- [17] Westarco. Proceso de Soldadura TIG - GTAW. (n.d.). [Online]. Disponible: <https://www.westarco.com/westarco/sp/education/blog/proceso-de-soldadura-tig.cfm>
- [18] CARBUROS METÁLICOS GROUP AIR PRODUCTS. Manual del soldador Soldadura con gas de protección, oxicorte y corte por plasma, vol. 3, pp 42041, 2018.
- [19] Plc, A. P., Welder's Handbook for Gas Shielded Arc Welding, Oxy Fuel Cutting & Plasmas Cutting, vol. 3, pp 800389, 2018.
- [20] Hobart Welding Training, Gas Tungsten Arc Welding EW369 GTAW. USA: Copyright, 2002

- [21] O'Brien, A. (2004). Welding Handbook, Volume2-Welding Processes, Part1. USA: Ed. American Welding Society
- [22] B.J. Bastian, Annette O'Brien, Kathy (2015). AWS WHB-5.9 Welding Handbook Vol5 Materials & Applications Part2.5. USA: American Welding Society
- [23] Andrew. Modern Welding. USA: The Goodheart-Willcox Company, 2013.
- [24] O'Brien, A. (2011). Welding Handbook, Volume4-MaterialsandApplications, Part1. USA: American Welding Society.