

INTRODUCCIÓN

La fabricación de tubería de acero inoxidable con costura se realiza doblando progresivamente una lámina hasta alcanzar un perfil anular y uniendo los dos extremos mediante soldadura de tungsteno en gas inerte, conocida generalmente como TIG (Tungsten Inert Gas) o como GTAW (Gas Tungsten Arc Welding).

El objetivo de este trabajo es estandarizar y controlar las características de operación para mejorar la calidad así como la productividad durante la operación de formado de tubería de acero inoxidable con costura producida en Tuberías ASPE .

Debido a la complejidad del objetivo planteado se segmentó el estudio en las siguientes etapas:

- ❖ Diagnóstico de las condiciones de operación.
- ❖ Proposición y ajuste de parámetros de operación de soldadura TIG en base al aporte térmico.
- ❖ Aumento en la velocidad de formado de tubería.
- ❖ Implementación del afilado de electrodos a 60°.
- ❖ Cambio de tamaño en el electrodo utilizado.

Este trabajo se realizó en la planta de TUBERÍAS ASPE S.A. de C. V., localizado en San Luis Potosí, S.L.P.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

Presidente: Prof. Noguez Amaya María Eugenia.
Vocal : Prof. Robert Nuñez Teresita del Niño Jesús.
Secretario: Prof. Rodriguez Reyes Leopoldo.
1er. Suplente: Prof. Aramburo Perez Gerardo.
2do. Suplente: Prof. García Galan Sergio.

Sitio donde se desarrolló el tema:

Tuberías ASPE S.A de C.V, Laboratorio de Mexinox S.A de C.V y Laboratorio de Metalografía del Departamento de Ingeniería Metalúrgica del edificio "D" de la Facultad de Química

Asesor del tema

Teresita Robert N.

M. en C. Robert Nuñez Teresita del Niño Jesús.

Asesor Tecnico

Victor Alfonso Chumacero

Ing. Victor Alfonso Chumacero Carbajal

Sustentante

Carlos Alberto Hernandez Saldaña

AGRADECIMIENTOS.

A mis viejos.

Gracias General por enseñarme a no rendirme, a ir siempre adelante, a levantarme después de cada tropiezo.

A mamá.

Por ser tan BELLA, por todo el amor y tu paciencia para enseñarme a disfrutar cada momento de esta vida, por alimentar mi esperanza y quererme como solo tu sabes.

En fin a ambos por ser mi mayor y mas preciado tesoro, gracias por estar siempre conmigo por esos grandes consejos por su cariño y comprensión por ayudarme a crecer por exigirme mejorar día a día y porque se que están siempre conmigo además de ser esa hermosa pareja que entrega todo a cambio de nada, y por SOBRETUDO gracias por creer en mi.

A Víctor.

Vitorio gracias por apoyarme, por creer en mi y por impulsarme a soñar, a Tatis gracias por existir y traer una nueva luz a casa, a Susana por aguantar al Vitorio.

A mi abuelo Melquiades, por su sabiduría y consejos por su increíble fuerza para ser mejor día a día, gracias abue.

A mi Abuela Refugio (QEPD), Gracias por acompañarme por esa ternura y amor en cada gesto en cada palabra, se que estarás siempre conmigo.

A mi Abuela Socorro (QEPD), por esa fuerza y energía que contagia.

A mi Abuelo Emiliano Por ser tan TU, tan autentico, por tu sencillez y sabiduría que inspira.

A Beto, Alma, Liliana Gracias por ese gran cariño que es correspondido y por haber llegado a completar esta bola de locos, por enseñarnos tanto.

A mis tíos

Mague por ser tan linda a Miguel y Nato por esa risa que inspira , en fin a Oscar, Vicky, Lalo, Beto, Toña, Rafa. Tana, Chero, Mole. Gracias por aguantarme.

A mis Hermanos.

Fernando "Flaco" Salazar, Hugo "Chaparro" Mosqueda, por ser amigos, hermanos maestros alumnos, chalanos, en fin mil y un cosas, gracias por esa confianza y amistad. 'por su invariable apoyo a través de los años y además por completar este trío de locos, gracias.

A los papis de Fernando por aguantar al Trío.

A Rafael " Huasteco" Miranda y Ariadna Gastellum. por esas palmadas y porque no por ese par de nenes, gracias.

A ti Amor.

Gracias por apoyarme por darme fuerza y sobre todo por esos bellos Ojos.

A Robert López, Mary, Robert. Jr. Y Raúl Andrés Ritmo, por tanto cariño recibido y por haberme tendido la mano, gracias familia.

A los Metaleros.

Sergio " Mac" Fabre mi casi Hijo y a su linda esposa Violeta, Luisa Fer, Atenea, Gonzaga, Nacho, Carlos "Patás" Cortez, Carlos " Parka " Magaña., Roma, Chepe, Nicolás, Gerardo " Bestia", Alfonso "Poncho", Ruso, Ophelia "...." , y Laura Hernandez, y a toda la tribu del metal.

Al Ing. Víctor Chumacero por su apoyo y confianza, por hacer realidad este sueño.

A la gente de ASPE.

Diego Turrubiarres , Ernesto, Oscar, Chuy, José el jefecito, Martín " manitas", a Juan Juárez y a ese gran equipo gracias.

A mis muchachos la mejor cuadrilla del mundo.

Tiburcio, Luisito, Manuel " Capeto", Luis, Patricio, Rafilla, y al güero, a toda esa gente, que me permitió trabajar y aprender de ustedes.

A La gente de Mexinox.

Dr, Javier Avila por sus consejos y apoyo.

Al otro ídolo, José Luis Jiménez, mi admiración y respeto.

A Pedro Torres por aguantar a los powerrangers.

A David "Pelucas" por su apoyo.

A LAS CHICAS

Gaby, Meche, Olga y Elsitita, gracias por todo.

Muy Especialmente a la Maestra Teresa Robert .

Por su incalculable y valiosísimo apoyo, por su paciencia y dedicación para terminar este trabajo

Y A TODA LA GENTE QUE CONTRIBUYO PARA TENER ESTO, MIL GRACIAS.

CAPITULO 1.

PROCESO DE FORMADO DE TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE CON COSTURA

PROCESO ASPE

En Tuberías Aspe se procesa y/o utiliza lamina de acero inoxidable de tipo ferrítico y austenítico como materia prima del proceso de formado de tubería con costura, el proceso comprende líneas de producción estándar para usos específicos, estas líneas de producto comprenden a:

- ❖ Tubería de uso Industrial.
- ❖ Tubería de uso Ornamental.
- ❖ Tubería de uso Automotriz.

El presente trabajo se desarrolló en el área de molinos TIG, haciendo especial énfasis en la línea de fabricación de tubería de uso industrial y automotriz.

En la figura 1, se presenta el diagrama de flujo del proceso de formado de tubería de acero inoxidable.

Posteriormente se explican cada una de las etapas estudiadas.

Proceso de formado de tubería de acero inoxidable.

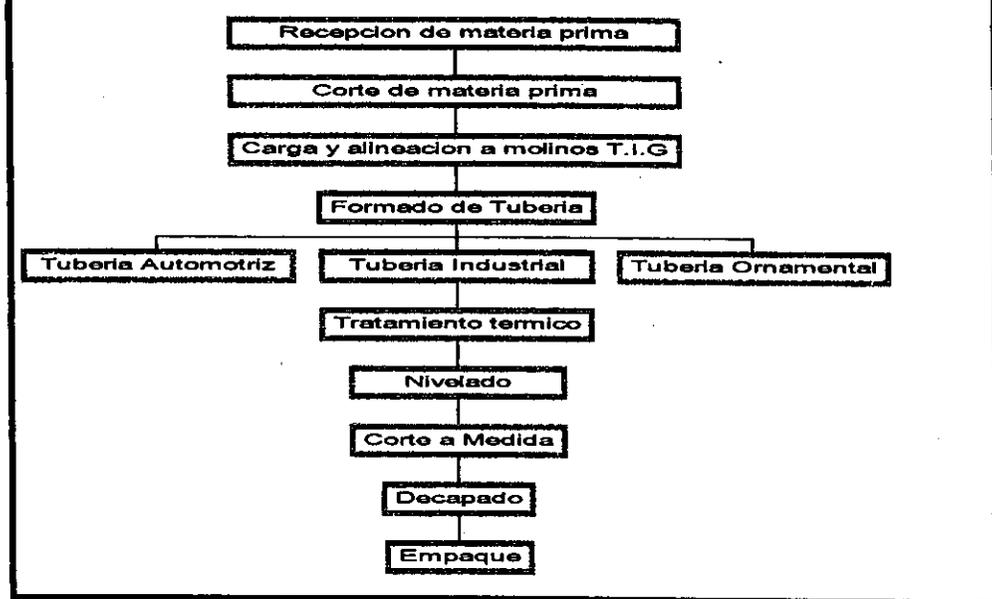


Figura 1. - Proceso de formado de tubería de acero inoxidable.

❖ RECEPCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE MATERIA PRIMA

Este punto es el inicio del proceso. Como materia prima se recibe lámina de acero inoxidable ferrítico o austenítico en diferentes espesores. La presentación de esta materia prima es en rollos, llamados bobinas, provenientes de diferentes proveedores, siendo el principal Mexinox S. A de C. V.

El departamento de control de calidad realiza una serie de pruebas a la materia prima (ensayo de dureza, resistencia a la tensión, análisis químicos, etc.) asignándole un certificado de aceptación según las normas de calidad vigentes en la planta.

Una vez aceptada, se traslada al almacén de materia prima.

❖ CORTE DE BOBINA

El material es sometido a acciones de corte para redimensionarlo, debido a que el tamaño con el que se reciben las bobinas exceden la capacidad de los molinos de formado.

El corte es realizado por medio de discos no abrasivos, en maquinas automáticas que nos permiten tener una mayor precisión durante la operación, obteniéndose pequeñas bobinas de acero de diferentes dimensiones, las cuales son almacenadas para posteriormente ser distribuidas a los diferentes molinos de acuerdo al programa de fabricación.

❖ CARGA Y ALINEACIÓN DEL FLEJE DE ACERO AL MOLINO.

La materia prima se introduce al molino de formado a través de los rodillos, operación que se conoce como enhebrar el molino, los cuales imprimen al material una deformación progresiva.

En la figura 2a se detallan las diferentes partes de un molino, consistentes en una serie de rodillos, que se dividen de acuerdo a la función que realizan, esto es :

- Forming Pass (rodillos de formado) que se encargan de dar la deformación principal del fleje.

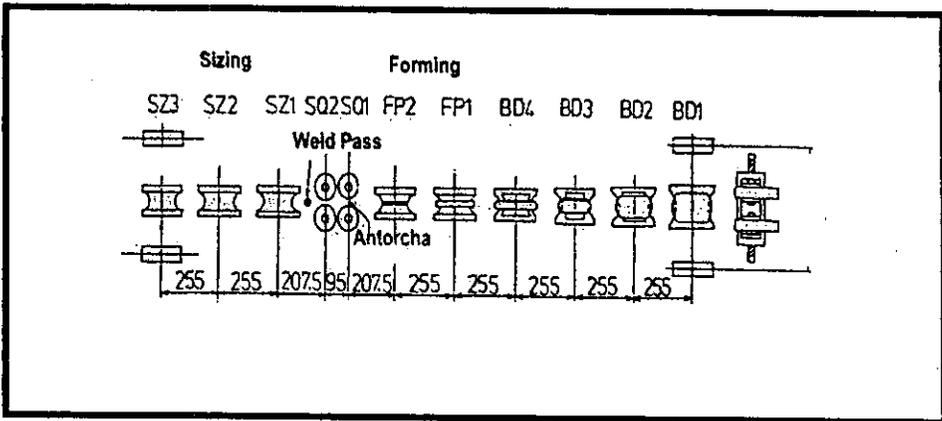
- Weld Pass, conocidos como paso soldador donde se lleva a cabo la unión del material por medio de soldadura GTAW.

- Sizing Pass, (Rodillos de calibración) donde se realiza el ajuste final de diámetro después de la soldadura de la tubería.

Para obtener un producto que satisfaga las normas de calidad, la alineación y calibración del molino es una operación fundamental ya que de lo contrario se podrían presentar problemas de formado que se reflejarían directamente durante el soldado del material originando traslapes, soldadura desviada, mal acabado, giramiento, etc.

Antes de empezar el formado el molino ha sido cargado con los rodillos adecuados para el producto a formar y ha sido alineado y calibrado específicamente para este producto, esta alineación y calibración son tomadas de tablas de calibración existentes en planta.

Fig. 2a, Diagrama de un molino formador típico, se detallan las principales secciones del molino.



En la Fig. 2b, se observa la deformación gradual del fleje conforme avanza por el tren de rodillos hasta tomar la forma de un tubo, y es en el punto FP1 donde se lleva a cabo la unión por medio de soldadura.

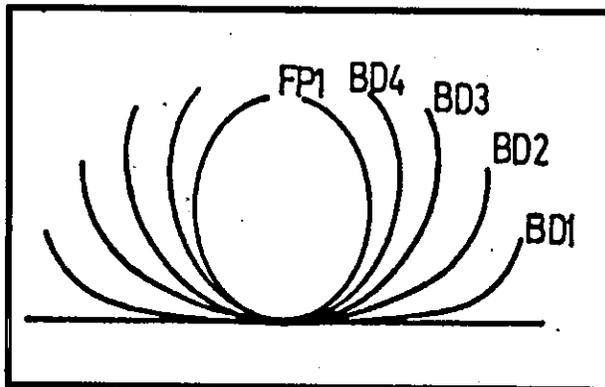


Fig. 2b) Deformación gradual del fleje hasta obtener la forma circular.

Cada una de las siglas indica el numero de rodillo y/o paso horizontal del herramental del molino.

❖ OPERACIÓN DE FORMADO DE TUBERÍA

Cuando el material ha sido cargado y alineado al molino, éste es puesto a funcionar y el fleje de acero avanza a través de los diferentes juegos de rodillos o pasos formadores; cada uno de estos pasos se encarga de dar una deformación gradual al material como se observa en la figura 2b.

Al pasar el ultimo paso formador (en algunos herramentales se cuentan como Finn Pass ó paso aleta) el fleje ha adoptado la forma de un tubo, por lo que el siguiente paso es la unión del material en el paso soldador, que es el punto de soldadura GTAW. Las condiciones de soldadura y velocidad de formado del material son características de cada producto terminado.

Después de que el material ha sido soldado, se le da un enfriamiento a base de aceite soluble en agua, posteriormente un pulidor se encarga de remover la parte superior de la soldadura, para evitar topes en ésta (solamente en los aceros austeníticos). El tubo posteriormente pasa a través de los rodillos calibradores donde se realizan los ajustes finales de diámetro.

La tubería se produce bajo pedido de los clientes, bajo diferentes normas de fabricación, dependiendo de las características y uso final de la tubería.

Las principales normas de trabajo a las que se encuentra sujeto el proceso son: ASTM A-554, Ingria 003/90, ASTM A-312, ASTM A-249 y ASTM A-269

En la tabla 1 se muestra la aplicación, la norma de fabricación y el tipo de acero utilizado para cada producto.

TABLA 1. NORMAS DE FABRICACIÓN DE TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE CON COSTURA.

APLICACIÓN	TIPO DE ACERO	NORMA
Tubería de uso Industrial	Austenítico	A-312 A-249 A-269
Tubería de uso Automotriz	Ferrítico	Ingria 003-90
Tubería de uso Ornamental	Austenítico	A-554

Dependiendo de la norma de fabricación, la tubería es sometida a diferentes pruebas, que pueden ser: Pruebas mecánicas, abocinado y pestajeado, expansión, aplastamiento, aplastamiento invertido y doblez inverso. También se inspecciona con corrientes de Eddy.

Al tratarse de un proceso continuo, el control de calidad existente sobre el proceso es riguroso, llevándose mediciones periódicas que son introducidas al control estadístico del proceso, para confirmar que esté dentro de los límites de control preestablecidos.

❖ **TRATAMIENTO TERMICO.**

La tubería de uso industrial se somete a un tratamiento térmico de relevado de esfuerzos y redisolución de los carburos que han precipitado en los límites de grano del material debido al proceso de soldadura. La precipitación de carburos ocasiona mermas en las propiedades metal-mecánicas del acero y disminución de su capacidad de inoxidableidad (sensibilización).

La tubería se somete a un calentamiento en un horno, en el rango de los 1000 a 1050 °C y posteriormente se enfría bruscamente en agua.

❖ NIVELADO

Debido al tratamiento térmico al que ha sido sometido el material, la tubería se distorsiona, por lo que es necesario enderezarlo por medios mecánicos; una vez que cumple con los requerimientos de rectitud se envía a la siguiente estación del proceso.

❖ CORTE A MEDIDA

Dependiendo del requerimiento del cliente, se procede al corte semiautomático de la tubería. Una vez terminada esta operación el material prosigue la ruta del proceso.

❖ DECAPADO QUÍMICO

Es aplicado solamente a los aceros que han recibido tratamiento térmico para la disolución de los carburos. Durante esta operación se forma una película de óxido sobre la tubería, que tiene que ser removida. Esta remoción se da por inmersión del material en una solución de ácido nítrico y ácido fluorhídrico, con una composición y temperatura específica, que le confiere un aspecto estético.

❖ EMPAQUE

Una vez que el producto ha pasado una serie de pruebas finales aplicadas por el departamento de control de calidad es certificado y empacado de acuerdo a los requerimientos del cliente.

Este paso es la fase final en la fabricación de la tubería.

ACEROS INOXIDABLES

El termino de acero inoxidable se asigna a un grupo de aleaciones que presentan como componentes principales al Hierro y al Carbón en combinación con cromo y níquel, principalmente, con lo que adquieren ciertas características de inoxidableidad.

Para que una aleación base Hierro-Carbón (acero) pueda ser considerada inoxidable, debe presentar un contenido mínimo de cromo del 11 %. El Cr es un metal altamente reactivo que forma una capa de oxido continua, con una alta adherencia y que es químicamente muy estable lo que le permite soportar condiciones adversas para la mayoría de los aceros.

El hablar de los aceros inoxidables como un todo queda fuera de la idea general de este trabajo debido al gran número de familias existentes, por lo que solamente mencionaremos a las dos familias de aceros inoxidables utilizados en el proceso.

Los aceros inoxidables presentan una resistencia a la corrosión superior a la de los aceros al carbón en presencia de diferentes medios y reactivos agresivos a altas y bajas temperaturas, lo cual, aunado a buenas propiedades mecánicas, han permitido un gran desarrollo en esta área de la metalurgia.

Es imposible pensar que exista un material que pueda soportar el ataque de todos los medios agresivos conocidos, generalmente los aceros inoxidables presentan baja resistencia a la corrosión en presencia de elementos pertenecientes al grupo de los halógenos, como son cloro, flúor, bromo, etc.

Para realizar una correcta selección del material a utilizar se deben considerar las características mecánicas requeridas conjuntamente con las características del medio en el que va a operar, la presión y temperaturas de trabajo así como la composición química.

❖ CLASIFICACIÓN

Los aceros inoxidable se clasifican de acuerdo al tipo de estructura metalográfica (microestructura) que presenten, esto es:

Austeníticos (Fase austenita)

Ferríticos (Fase ferrita)

Martensíticos (Fase martensita)

Dúplex (Ferrítico-Austenítico)

Cada grupo presenta características diferentes, tanto en composición como en propiedades metalúrgicas y mecánicas. La diferencia específica entre los grupos puede ser detectada en base a la diferente respuesta obtenida al aplicárseles un tratamiento térmico.

De acuerdo a la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) los aceros inoxidable se clasifican por sistemas numéricos de tres cifras, la primera nos indica el grupo al que pertenecen, y las dos segundas sus aleantes mas significativos, en la tabla 2, se puede observar claramente la clasificación.

TABLA 2. CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES DE ACUERDO A LA SAE

DESIGNACIÓN SAE	GRUPO
2XX	Cromo-níquel-manganeso; austenítico, no templable
3XX	Cromo-níquel; austenítico, no templable.
4XX	Cromo, ferrítico, magnético.
5XX	Cromo; bajo en cromo, resistente a alta temperatura.

XX Contenido de aleantes mas significativos.

❖ METALURGIA DE LOS ACEROS INOXIDABLES

El estudio de los sistemas binarios nos ayuda a comprender las fases que forman a los aceros inoxidable, ya que se derivan de las formas alotrópicas del hierro, las cuales pueden ser examinadas en el extremo izquierdo (100% Fe) del diagrama del sistema Fe-Cr, Fig. 3.

En el intervalo de temperaturas comprendido entre 1400 y 1539 °C existe solución sólida de hierro puro con una cristalografía cubica centrada en el cuerpo (BCC) que es denominada ferrita delta (δ).

En el rango entre los 910 y 1400 °C la estructura cristalina es del tipo cúbica centrada en las caras (FCC) que se conoce como austenita (γ). Por debajo de los 910 °C se presenta una nueva transformación y la austenita cambia otra vez a la estructura BCC, fase que se conoce como ferrita alfa (α). Es imposible físicamente lograr distinguir a la ferrita alfa de la ferrita delta retenida a baja temperatura.

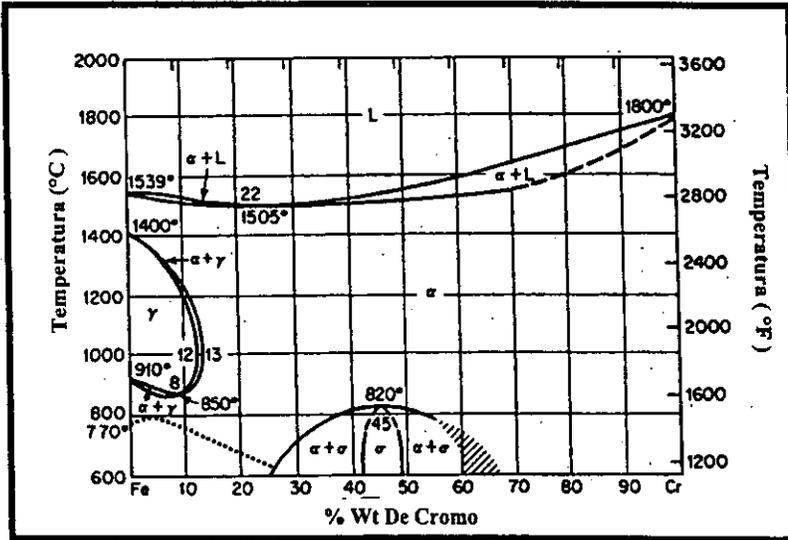


Fig. 3. Diagrama hierro-cromo al equilibrio.

En la Fig. 3 existe una zona delimitada por una línea punteada que representa una transformación magnética llamada Temperatura de Curie, por encima de esta línea el hierro es paramagnético y por debajo ferromagnético.

Analizando el lado izquierdo del diagrama, Fig. 4, se puede apreciar que contenidos de cromo superiores al 7% disminuyen la temperatura de los puntos de cambio cristalográfico y al llegar al 13% de cromo, no existe ya alguna reacción verificable por lo que la ferrita existe a cualquier temperatura.

Por lo que se concluye que el cromo es un elemento ferrizante o formador de ferrita; el molibdeno y el silicio exhiben esta misma característica.

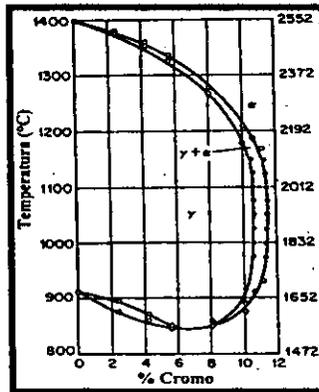


Fig. 4. Detalle del bucle austenítico en el diagrama hierro-cromo al equilibrio.

Los aceros inoxidable austeníticos presentan un contenido de Cromo mayor al 16% lo que hace suponer que presentarán una estructura totalmente ferrítica; sin embargo, como su nombre lo indica, presentan una estructura formada por cristales de austenita, debido a la influencia del níquel. En el diagrama de fases Hierro-Níquel, Fig. 5, se analiza ésto con más detalle.

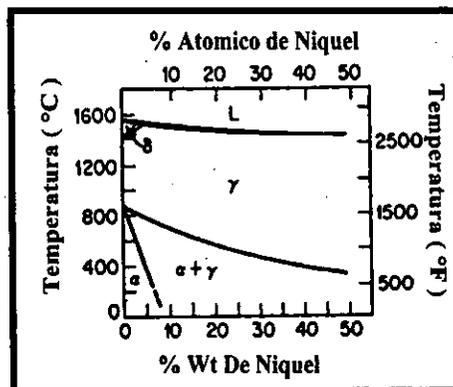


Fig. 5. Diagrama Hierro- Níquel al equilibrio.

En este diagrama, Fig. 5, es posible observar el incremento de la zona de austenita conforme aumenta el contenido de níquel en la aleación, por lo que el níquel se considera un elemento austenitizante o formador de austenita.

Los aceros inoxidable austeníticos involucran a la serie 300 (Fe-Cr-Ni) por lo que es necesario hablar de los equilibrios ternarios.

En la Fig. 6 se presenta el diagrama de fases Fe-Cr-Ni, las aleaciones comprendidas en la composición de Cr 16-19% y Níquel de 6-12% se encuentran dentro del campo austenítico.

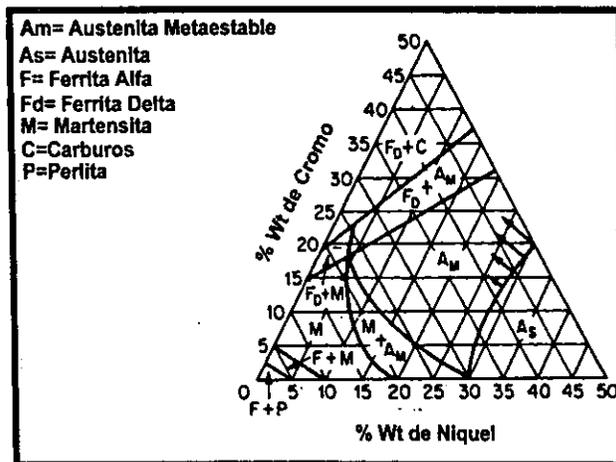


Fig. 6. Sistema ternario Hierro-Cromo-Níquel

En estas aleaciones se pueden formar pequeñas cantidades de ferrita delta, debido a un calentamiento a alta temperatura combinado con alguna posible heterogeneidad de la estructura de colada.

❖ ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS.

Los aceros austeniticos representan el 65-70% del grupo de los aceros inoxidables que se utilizan en la actualidad.

Las aleaciones mas utilizadas de este grupo pertenecen a la serie 300, de acuerdo a la AISI (American Iron and Steel Institute). Estas se encuentran en el rango de composiciones: Cromo: 18 - 30 % y Niquel: 4 - 22 %.

La clasificación de estos aceros se muestra en la tabla 2 y su composición nominal en la tabla 3.

Tabla 3. Composición nominal de los aceros inoxidables austeniticos normales de proceso.

TIPO	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	OTROS
304	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	18.0-20.0	8.0-10.50	---	---
304L	0.03	2.00	0.045	0.030	1.00	18.0-20.0	8.0-12.0	---	---
304N	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	18.0-20.0	8.0-10.50	---	0-10-0.16N
316	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	---
316L	0.03	2.00	0.045	0.030	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	---
316F	0.08	2.00	0.045	0.100 min	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	1.75-1.25	---

* Valores dados en por ciento

La estructura austenítica se debe principalmente al alto contenido de níquel así como a la adición de elementos aleantes que proveen de una matriz austenítica a cualquier temperatura. La transformación de baja temperatura de austenita- ferrita no necesariamente ocurre a temperatura ambiente, de forma que la estructura de este acero consiste en cristales de austenita retenida, con presencia en ocasiones de ferrita delta.

En la tabla 4 se mencionan los elementos de aleación mas comunes y sus principales efectos.

Tabla 4. Efecto de los elementos de aleación en aceros austeníticos.

ELEMENTO	TIPO DE ACERO	CARACTERÍSTICAS
Carbón	Todos los tipos	Fuerte formador de austenita, puede precipitar en forma de carburos con el cromo y provocar corrosión intergranular.
Cromo	Todos los tipos	Promueve la formación de ferrita, incrementa la resistencia a la corrosión.
Níquel	Todos los tipos	Promueve la formación de austenita, aumenta la resistencia a la corrosión y al esfuerzo.
Cobre	17-4 PH	Aumenta la resistencia a la corrosión en ciertos ambientes, además de reducir el riesgo de corrosión bajo esfuerzos, provee de cierto efecto de aumento de dureza.
Nitrógeno	Tipos especiales	Es un formador de austenita veinte veces superior al níquel
Columbio	347	Promueve la formación de ferrita, evita la precipitación de carburos, es un refinador de grano.
Manganeso	Todos los tipos	Aumenta la estabilidad de la austenita
Molibdeno	316, 317	Promueve la formación de ferrita, provee de una mayor resistencia al esfuerzo.
Fósforo y selenio		Aumenta la maquinabilidad del acero, disminuye su soldabilidad.
Silicio	302B, 314	Promueve la formación de ferrita
Titanio	321	Evita la precipitación de carburos, promueve la formación de ferrita, es un refinador de grano.
Aluminio	17- 7 PH	Fuerte formador de ferrita, presenta cierto efecto endurecedor del acero.

El aumento en el contenido de níquel tiende a reducir la temperatura de transformación de la austenita, mientras que la presencia de cromo hace que la transformación sea mas lenta, (el bucle austenítico tiende a disminuir su área de acción) de esta manera la estabilidad de la austenita aumenta conforme al contenido de níquel.

Un aspecto importante durante la operación de soldadura de los aceros inoxidable austeníticos es la precipitación de carburos, a continuación se profundiza en el tema .

❖ PRECIPITACIÓN DE CARBUROS

Los contenidos de carbón en la serie 300, varían desde un 0.008 a 0.14 % de carbón. Se podría pensar que estas cantidades tan pequeñas de carbón no ocasionan problemas, sin embargo, puede ocurrir que cuando el acero es enfriado lentamente, el carbón libre en solución se asocia a algunos de los elementos aleantes y precipite; generalmente de la forma $M_{23}C_6$ o, en el caso de los aceros grado L (bajo carbón), M_7C_3 .

Los carburos del tipo $M_{23}C_6$, presentan como elemento constituyente principal al cromo, por lo que se conocen generalmente como carburos de cromo, aunque es posible que otros elementos aleantes como Molibdeno y Hierro puedan llegar a sustituirlo. Una designación especial para estos carburos es $(Cr, Fe, Mn)_{23}C_6$. Para formar estos carburos el cromo (máximo 90% en los precipitados) es tomado de la matriz (principalmente del límite de grano), dejando zonas pobres en Cr con una disminución en la resistencia a la corrosión, lo cual está ligado a la disminución en la resistencia a la corrosión observada en los aceros inoxidable, lo que origina corrosión intercrystalina (intergranular), esto por la preferencia que presentan los carburos en precipitar en esta zona específica. Esto se observa con mayor claridad en la soldadura, específicamente en la zona conocida como ZAC (Zona Afectada Por Calor) y/o HAZ (Heat Afected Zone) en los procesos de soldadura.

La precipitación de este tipo de carburos ocurre por lo general en un rango de temperaturas comprendido entre los 500 a 900 °C (conocida como zona de sensibilización) La cinética de la precipitación depende en gran mayoría de la composición química de la aleación, en la Fig. 7 se muestra el diagrama de precipitación de carburos para un acero austenítico tipo 304.

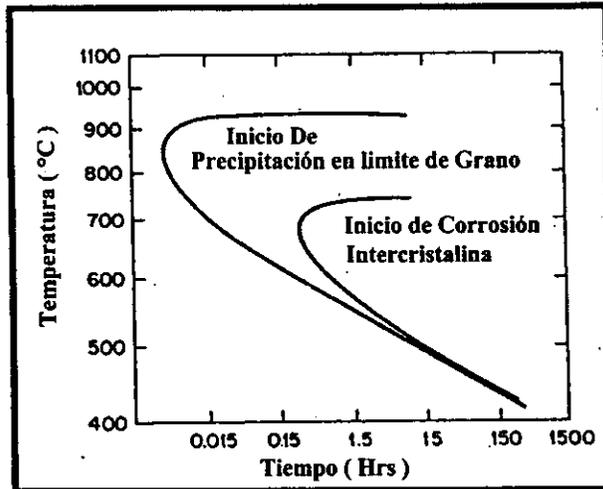


Fig. 7. Cinética de precipitación de carburos en aceros austeníticos.

La precipitación se presenta inicialmente en la interfase austenítica-ferrítica y posteriormente en los límites de grano austeníticos, el tiempo para que se logre la precipitación de los carburos es mínimo, como puede ser observado en la Fig. 7. En el proceso de soldadura debemos considerar que se alcanzan temperaturas muy altas en intervalos de tiempo muy pequeños.

La precipitación de carburos puede ser evitada si:

- a) El contenido de carbón es inferior al 0.03% (Aceros inoxidable grado " L "), lo cual no siempre es efectivo, ya que se han logrado identificar carburos de la forma M_7C_3 .
- b) Adición de aleantes que presenten una mayor afinidad al carbón que el cromo, como es el caso del vanadio, logrando evitar la precipitación de carburos de cromo lo que impide la disminución localizada de cromo y permite a la aleación mantener una alta resistencia a la corrosión.

Si la precipitación no ha podido ser evitada, existen varios métodos para lograr la redisolución de los carburos en la matriz, estos métodos son generalmente tratamientos térmicos que ocasiona el restablecimiento de los contenidos de cromo en la matriz con lo que la resistencia a la corrosión se ve restablecida.

El principal tratamiento de redisolución por su sencillez consiste en tratar el material entre los 1000-1100 °C, seguido por un brusco enfriamiento en agua, lo que permite el restablecimiento de la característica de resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable.

❖ ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS

Se denominan aceros inoxidable ferríticos, aquellos que contienen un porcentaje de cromo comprendido en el rango de 11.5 a 30% como principal elemento de aleación y un contenido de carbón que es controlado en los mas bajos niveles posibles.

Este tipo de aceros prácticamente no pueden ser endurecidos por tratamiento térmico, son ferromagnéticos y pueden ser endurecidos por trabajado en frío, presentan características que los hacen menos resistentes a la corrosión a altas temperatura que los aceros austeníticos, pero mayor que la de los aceros martensíticos.

Tabla 5. Composición nominal de los aceros inoxidable ferríticos normales de proceso.

TIPO	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	OTROS
409	0.08	1.00	0.045	0.045	1.00	10.50-11.75	6* C Ti
409L	0.03	1.00	0.045	0.040	1.00	10.50-11.75	0.075
430	0.12	1.00	0.040	0.030	1.00	16.0-18.0
430F	0.12	1.25	0.060	0.150	1.00	16.0-18.0	0.60

* Valores dados en por ciento

La ductilidad que presentan este tipo de aceros inoxidable es buena, especialmente en los aceros 409, 430, 434 y 436, que pueden ser formados mecánicamente en geometrías muy complejas, las propiedades de estampado son buenas debido principalmente a su bajo coeficiente de endurecimiento.

En el caso de los aceros ferríticos la resistencia a la fragilidad (facilidad a la propagación de la fractura) es alta, mientras que la temperatura de transición frágil-dúctil se observa cercana a la temperatura ambiente.

Algunos aceros inoxidable ferríticos (405, 429, 430, 434) tienden a formar pequeñas cantidades de austenita a altas temperaturas, lo que ocasiona aumento en la fragilidad de la aleación debido a la probable transformación de austenita en martensita, que es una fase frágil.

El trabajo mecánico aumenta las tensiones presentes en el material pero afecta en bajo grado su endurecimiento, este no puede ser comparado con el de los aceros austeníticos que tienen que ser sometidos, en la mayoría de los casos, a tratamientos térmicos de relevado de esfuerzos. Los aceros inoxidable ferríticos se usan sin ser sometidos a tratamientos térmicos.

Uno de los graves problemas que presentan los aceros inoxidable ferríticos es la tendencia al crecimiento de grano al ser sometidos a un calentamiento, esto podría ser rectificado con algún tratamiento térmico de refinación de grano pero como no presentan una temperatura de transformación, solo puede ser logrado por un trabajado mecánico y un subsecuente tratamiento térmico de recristalización, lo que no es costeable en la mayoría de los procesos.

Este problema se presenta de manera común en la zona afectada por calor (en materiales que han sido sometidos a operaciones de soldadura o expuestos a altas temperaturas), disminuyendo marcadamente la ductilidad y aumentando su fragilidad.

Además de lo citado anteriormente, en este tipo de aceros se presenta una fragilización muy especial, conocida como fragilidad de 475 °C o fragilidad Azul, que se presenta en el rango de temperaturas ubicado entre los 400 y 565 °C y está caracterizado por un aumento en la dureza de la aleación y una disminución en su ductilidad con el consiguiente aumento en la fragilidad, este fenómeno se presenta mas severamente en los aceros ferríticos con altos contenidos de cromo. La fragilidad azul se ha tratado de explicar como la precipitación de una fase rica en cromo con una estructura cristalina de tipo BCC. Uno de los fenómenos mas estudiados, conjuntamente con la fragilidad a 475, es el ampollamiento que se presenta en la mayoría de los aceros ferríticos y es uno de los mas perjudiciales para las propiedades mecánicas.

La sensibilización de los aceros ferríticos no es muy común, pero se puede presentar después de un rápido enfriamiento desde una temperatura promedio de 925 °C, la precipitación de carburos se desarrolla principalmente en las orillas de las zonas soldadas (ZAC). El mecanismo y la cinética de la precipitación de carburos son muy parecidos a los de los aceros austeníticos.

Pero a diferencia de estos, una disminución en el porcentaje de carbón no previene la precipitación, excepto en un solo caso que es el del acero inoxidable ferrítico tipo 29-4-2, (0.01% C max. y 0.015 % N), los demás grados de aceros ferríticos necesitan la adición de titanio o Columbio como estabilizador.

En la parte central del diagrama Fe-Cr, Fig. 3, se presenta una zona de existencia de fase Sigma en aceros con contenidos de cromo del 15 a 20% de cromo y temperaturas entre los 500 y 800 °C, que es altamente perjudicial debido a su fragilidad. Otras fases son la fase Chi y la Lavalles que presentan características muy particulares para su aparición.

SOLDADURA

EL PROCESO DE SOLDADURA

La soldadura es la unión de un material por métodos químicos ó mecánicos.

Se justifica el uso de la soldadura cuando se requieren piezas continuas o de formas complejas que no pueden ser obtenidas directamente de la fundición en una sola pieza, debido a lo impráctico que resultaría el proceso.

El procedimiento tradicional para formar las piezas deseadas es el de unir las piezas con remaches o tornillos. La soldadura, permite la unión de complejas geometrías con rapidez y economía, lo que ha originado el desplazamiento de los procesos tradicionales de formado de piezas.

La unión de los metales puede realizarse por métodos mecánicos ó con fuentes de calor que propicien una fusión parcial del material, produciendo una interfase líquida que formara la unión después de que solidifique; esta interfase es propiamente la soldadura, en la cual se observa una zona aledaña que presenta características diferentes a la de la interfase y se conoce como:

Zona Afectada por Calor conocida también como HAZ(Heat Afected Zone), es la zona aledaña inmediata a la interfase de soldadura, que no ha sufrido fusión pero ha visto afectada sus características microestructurales debido al ciclo térmico del proceso.

Generalmente en la zona de soldadura se crea el menor numero de problemas; pero en la región conocida como zona afectada por calor (ZAC), es donde se localizan en mayor grado. Esta zona comprende el rango de temperatura que abarca desde el punto de fusión hasta la temperatura ambiente, lo cual afecta algunas de sus propiedades mecánicas y metalúrgicas, debido a la naturaleza de la fuente de calor siempre se generara una zona vecina a la soldadura.

En este trabajo el proceso de soldadura utilizado (TIG y/o GTAW) es por fusión, por lo que solamente describiremos este tipo de procesos. Este proceso se basa en la fusión del metal a través de una fuente de calor concentrado que puede ser una flama, un arco eléctrico, un haz electrónico o una resistencia eléctrica. El proceso de soldadura TIG o GTAW se basa en un arco eléctrico como fuente de calor.

❖ EL ARCO DE SOLDADURA

El arco eléctrico que se utiliza en el proceso de soldadura es una descarga de corriente elevada, de baja tensión, que opera generalmente en la escala de 10 a 20000 amperes y de 10 a 50 Volts.

En el arco, los electrones fluyen a través del cátodo y son trasladados de una zona caliente de gas ionizado al ánodo. Estructuralmente el arco eléctrico puede ser seccionado en 5 partes las cuales se muestran en la figura 8 y son :

- a) El " foco del cátodo " que es la parte del electrodo negativo del que son emitidos los electrones.
- b) La " zona de caída de tensión catódica ": Zona gaseosa adyacente al cátodo, en la cual tiene lugar una gran disminución del potencial.
- c) La "Columna del arco ": Parte visible y brillante del arco, caracterizada por su elevada temperatura y por su baja escala de potencial (la columna esta compuesto de gas ionizado Plasma.)
- d) La " Zona de caída de tensión anódica " : Zona gaseosa adyacente al ánodo, en la cual tiene lugar una disminución del potencial
- e) El " Foco de ánodo ": que es la parte del electrodo positivo en la que son absorbidos los electrones.

❖ CÁTODO:

Se han observado tres tipos de arcos de soldadura, en metales sólidos:

1. Pueden aparecer uno o mas focos pequeños de cátodo, y recorrer a gran velocidad (5-10 m/s) la superficie del metal, dejando una huella visible.

Este tipo de cátodo (cátodo móvil) es característico del metal sobre el que se forma, por ejemplo en el aluminio existen focos múltiples que engendran una serie compleja de pistas ramificadas, mientras que sobre el cobre la huella es generalmente simple y sin ramificar.

La película de oxido de la superficie del metal se elimina de la huella de este tipo de foco de cátodo , aunque en ocasiones también se pierde una capa de metal.

La intensidad de corriente es del orden de 10^4 ó 10^5 amperes por centímetro cuadrado, el cátodo móvil reviste una gran importancia industrial ya que la película de oxido es eliminada de la superficie del metal tratado.

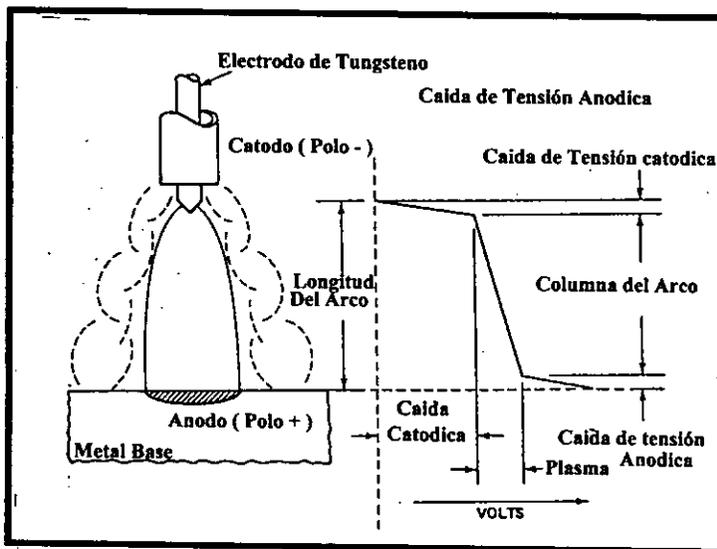


FIG. 8. ESTRUCTURA DEL ARCO ELÉCTRICO.

- El segundo tipo de cátodo se forma en la punta de los electrodos afilados de tungsteno en la soldadura TIG o GTAW, este foco de cátodo es fijado de forma característica en posición y presenta una alta densidad de corriente del orden de 10^4 amperes por centímetro cuadrado. Es visible como foco luminoso o queda definido por contracción de la columna del arco sobre la superficie metálica.

3. El tercer tipo de cátodo no forma un foco bien definido. Con un electrodo de acero al carbón revestido, por ejemplo, el cátodo parece cubrir la punta totalmente fundida en la varilla de acero. Se ha observado un tipo de cátodo similar, con el arco de TIG o GTAW, cuando el electrodo, en lugar de terminar en punta, presenta una forma redondeada al final; este tipo de arco puede operar como cátodo del segundo tipo o bien como un cátodo mal definido, presentando diferentes características de corriente y voltaje.

❖ ZONA DE CAÍDA DE TENSIÓN CATÓDICA

Las mediciones que se basan en la formación de un arco entre los contactos de apertura dan una profundidad en la zona de caída de tensión catódica de 0.001 cm aproximadamente, que es el mismo orden de magnitud que el paso libre principal del electrón.

La investigación de esta fina zona activada eléctricamente es extremadamente difícil y no es sorprendente que no existan los suficientes conocimientos acerca de las interacciones que existen dentro de ella.

Los cálculos de caída de tensión catódica, sugieren que en un electrodo de tungsteno en argón se presenten valores para la relación voltaje-corriente de 8 volts y 100 amperes, y que ésta aumenta conforme la corriente disminuye.

❖ LA COLUMNA DEL ARCO

El gas que se encuentra entre los dos electrodos se mantiene a altas temperaturas que oscilan entre los 6,000 °C en el arco de vapor de hierro y a 20,000 °C en el arco de tungsteno en argón. A esta temperatura, cualquier molécula o compuesto que se encuentre presente en el arco se encuentra disociado de forma total o parcial en sus átomos constituyentes, estos mismos átomos se encuentran ionizados y generalmente se les denomina como plasma. Esta columna de arco es eléctricamente neutra sin embargo, debido a que la masa del electrón es de un milésimo con respecto al ion positivo mas ligero, su movilidad es mucho mayor, por lo que la mayor parte de la corriente es transportada por los electrones. La

escala de potencial en la columna es baja con respecto a las zonas de caída de tensión en el cátodo y ánodo en la escala de 5-50 voltios por cm para el arco de tungsteno en argón. Como se sabe, el arco de soldadura se mantiene entre un electrodo de varilla y una placa e, independientemente de la polaridad, el arco se contrae en la varilla y se extiende hacia la placa, como se indica en la figura 8.

La difusión del arco tiene una consecuencia importante, ya que produce un chorro, este se conoce como jet de plasma, que es mantenido por fuerzas electromagnéticas, ya que dos conductores paralelos que transportan corriente en las mismas dirección se atraen entre si debido a la interacción de sus campos magnéticos.

❖ EL ÁNODO Y SU ZONA DE CAÍDA DE TENSIÓN

En el ánodo, los electrones entran nuevamente en el metal y liberan su calor de condensación el cual, aunado al calor transmitido por la columna del arco, permite la fusión del metal.

La cantidad de calor transmitida por el arco se incrementa a medida que aumenta la longitud del arco, pero, al mismo tiempo, la intensidad de corriente disminuye, lo que provoca que el foco del cátodo se torne mas difuso.

❖ CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL ARCO.

La característica eléctrica del arco es su relación entre el voltaje y la intensidad de corriente. Las variaciones en la longitud del arco ocasionan cambios en la corriente de soldadura, y, si la escala de fusión esta basada en las características eléctricas del arco, una disminución en la intensidad de corriente ocasionará una disminución en la escala de fusión. En la Fig. 9 se observa la influencia de estas variables en el arco.

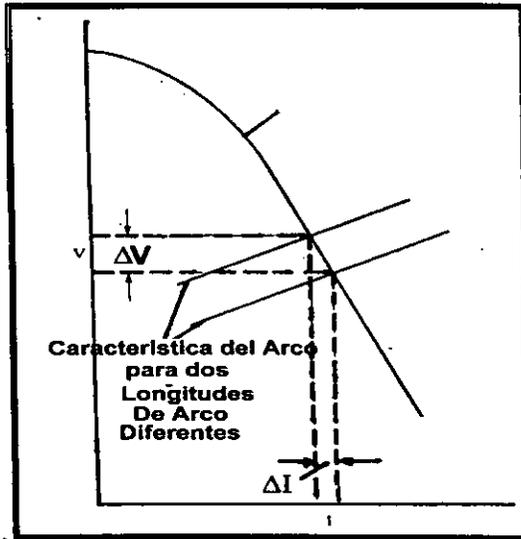


Fig. 9 Características eléctricas del arco.

❖ SOLDADURA DE LOS ACEROS INOXIDABLES

En la soldadura de los aceros inoxidables el coeficiente de conductividad térmica comparado con el del acero al carbón es aproximadamente de la mitad, lo que nos indica que el calor generado durante la operación de soldadura no se disipa de manera inmediata de la zona soldada. Esta concentración de calor puede dar origen a fracturas durante el enfriamiento; una manera de evitarlas es utilizar métodos de soldadura múltiples, así como barras de enfriamiento de cobre cercanos a la zona de soldadura, etc.

La preparación de la junta es muy importante en cualquier proceso de soldadura y, particularmente crítico en la soldadura de aceros inoxidables, por lo que la contaminación por grasa y aceites debe de ser eliminada en su totalidad, además de que se debe evitar la realización de cortes con herramientas que contengan alto contenido de carbón, ya que puede ocurrir desprendimiento y una adhesión posterior de pequeños fragmentos de herramental al material soldado; si recordamos los bajos niveles de concentración de carbón en los aceros

inoxidables, estos pequeños contaminantes pueden llegar a alterar localmente la composición de la unión soldada.

❖ SOLDADURA DE LOS ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS.

Los aceros inoxidables austeníticos, se consideran como de los más soldables dentro de la familia de los aceros inoxidables, ya que el único problema observado dentro de su soldadura es el de la precipitación de carburos; no es necesario dar un precalentamiento al metal base antes de ser soldado, pero es necesario dar un tratamiento térmico posterior a la operación de soldadura, para lograr la redisolución de los carburos, lo cual eleva nuevamente los niveles de resistencia a la corrosión y permite el relevado de esfuerzos. Los aceros austeníticos presentan, en algunos casos, pequeñas cantidades de ferrita que los hace susceptibles de sufrir fracturas en caliente durante la soldadura. La cantidad de ferrita (ferrita delta retenida) formada depende del enfriamiento y el subsecuente tratamiento térmico a los que sea sometida la aleación.

Para conocer la cantidad de ferrita presente en las uniones soldadas de los aceros austeníticos, el mejor método es la medición magnética con un instrumento calibrado de acuerdo a la norma AWS A4.2.

Si no se cuenta con este instrumental, es posible determinar la cantidad presente de ferrita formada por medio de los diagramas de Schaeffler, el Diagrama DeLong, 1973 WRC (nombrado así en el Welding Research Council, 1973). y el diagrama 1988 WRC, estos tres diagramas nos proporcionan valores aproximados de la cantidades presentes de ferrita. La diferencia entre el diagrama de Schaeffler y el diagrama de DeLong es que este último incorpora al nitrógeno dentro del Níquel equivalente. El diagrama 1988 WRC (que es la actualización del de 1973) es considerado en la actualidad como la mejor forma de predecir los niveles de ferrita presentes en la unión soldada.

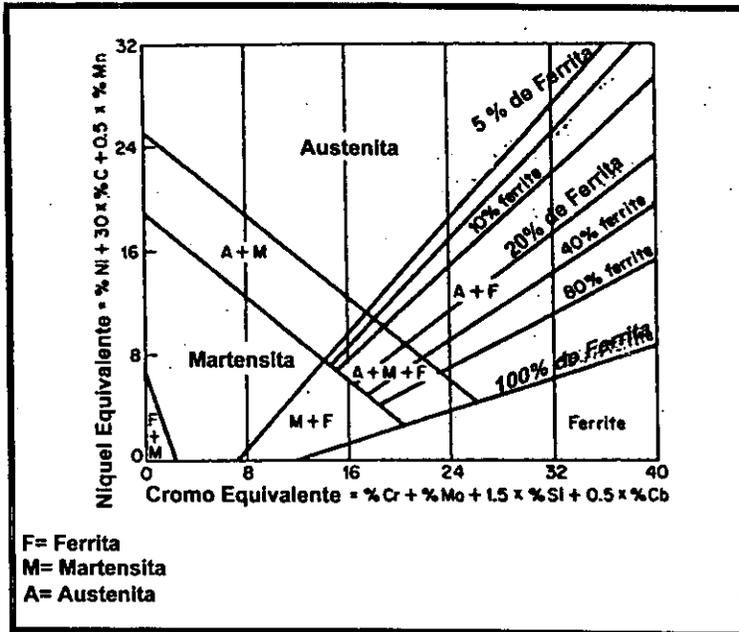


FIGURA 10. DIAGRAMA DE DELONG

La cantidad de ferrita formada, debe de ser lo mas baja posible, para prevenir los fenómenos asociados a ésta.

❖ SOLDADURA DE LOS ACEROS FERRÍTICOS.

Se considera a los aceros inoxidable ferríticos como mas difíciles de soldar que los aceros austeníticos debido a que se presenta aumento en el tamaño de grano, pérdida de ductilidad, sensibilización, fractura en caliente y, en algunos casos, formación de fase sigma, además de lo anterior es posible la formación de pequeñas cantidades de martensita, posterior a la operación de soldadura, esto debido a variaciones en la composición del material, se ha observado que la martensita formada se localiza preferentemente en los bordes de grano, esto ocasiona disminución en la ductilidad y un aumento en la fragilidad de la aleación.

❖ PROCESO TIG O GTAW

En el proceso de soldadura TIG (Tungsten Inert Gas) o GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), la fuente de calor es un arco eléctrico que se produce entre un electrodo no consumible de tungsteno y el metal de trabajo.

El electrodo, la zona de metal fundido, el arco y las zonas adyacentes al punto de soldadura se encuentran protegidas de la atmósfera por una capa protectora de gas inerte o una mezcla de gases.

Los peores enemigos en el desarrollo de un cordón de soldadura son el nitrógeno y oxígeno, presentes en la atmósfera, que pueden penetrar en el metal fundido y reaccionar con los diferentes componentes formando óxidos y nitruros perjudiciales, porosidad y por consiguiente agrietamiento y pérdida de ductilidad.

Los gases inertes que se usan como protección son el helio y el argón, que se pueden obtener por licuefacción y destilación del aire en cantidades considerables.

El argón tiene un peso atómico (39.984), aproximadamente diez veces mayor que el del aire, por lo que tiende a formar una cubierta sobre la zona soldada. Generalmente las soldaduras que utilizan argón como gas de protección presentan mayor penetración al centro del cordón de soldadura. Se prefiere este gas para materiales de bajo espesor o baja conductividad térmica ya que produce una menor intensidad en la columna del arco que el Helio.

El Helio presenta una mayor conductividad térmica que el argón, se prefiere para aplicaciones que necesitan una gran conductividad térmica (soldadura de cobre, aluminio y grandes espesores.) Su peso atómico (4.003) es mucho menor que el del aire, lo que provoca que tienda a levantarse en forma turbulenta, expandiéndose de la zona de soldadura, lo que ocasiona que se necesite un flujo mayor de gas para poder garantizar la zona de protección. La soldadura bajo protección de helio presenta en el cordón refuerzos mas anchos que en el caso del argón. Además, el uso de este gas ofrece una mejor maquinabilidad de la soldadura.

El uso de estos gases en combinación con otros gases como CO₂, nitrógeno e hidrogeno, además de proveer de protección a la soldadura, ayudan a aumentar la velocidad de soldado y la penetración.

Las principales características de estos gases y sus mezclas se describen en la tabla 6.

Tabla 6. Gases y mezclas mas usadas en la soldadura de aceros inoxidable para el proceso GTAW.

TIPO DE GAS O MEZCLA EMPLEADA	CARACTERÍSTICAS DEL GAS O MEZCLA
Argón	Mayor penetración al centro del cordón de soldadura, menor intensidad en la columna del arco, los requerimientos de gas son menores.
Helio	Refuerzos mas anchos en el cuerpo del cordón, mayor intensidad en la columna del arco, mayor requerimiento de flujo.
90%He-7.5%Ar-2.5CO ₂	Proporciona buena estabilidad al arco de soldadura, no produce distorsiones en la pieza dada la poca aportación de calor.
Ar-2%H ₂	Buena estabilidad del arco, aumenta la velocidad de soldadura, la intensidad de la columna del arco es alta.

Los factores que deben considerarse para la selección adecuada del gas de protección son: el metal a soldar, su espesor y conductividad térmica, así como su reactividad en la atmósfera de gas inerte.

Una de las principales desventajas de utilizar helio como gas de protección es el elevado costo del mismo además de presentar un consumo relativamente alto en comparación con el argón, así como que la limpieza catodica no existe en atmosferas de este tipo, en el caso del argón el costo es menor así como la limpieza catodica es posible de realizar con atmosferas de este tipo.

❖ FUNDAMENTOS DEL PROCESO

La naturaleza de la soldadura GTAW permite su uso en la mayoría de los metales y aleaciones, ya sea de forma automática o manual, en un gran rango de espesores que van desde un octavo de pulgada hasta cerca de 3 pulgadas en operaciones de un solo paso soldador (monocátodo). Es posible ampliar este rango de espesores con pasos soldadores múltiples (bicátodo y tricátodo).

Este tipo de soldadura presenta ciertas ventajas con respecto a otros procesos, ya que el calor se genera a partir de un arco eléctrico y la unión se realiza debido a una fusión parcial. Para obtener soldaduras de buena calidad la superficie a ser soldada deberá encontrarse libre de contaminantes y la alineación de la junta deberá de ser la correcta para evitar traslapes en la soldadura. Algunas de las ventajas de este proceso se describen a continuación:

No se requiere el uso de fundentes por lo que el material soldado no necesita ser sometido a operaciones de limpieza de residuos posteriores a la operación de soldadura.

La composición química de la soldadura no es afectada debido a que, en la mayoría de los casos, no se utiliza material de aporte,

El proceso puede ser realizado en cualquier posición con relativa facilidad.,

El proceso puede ser observado fácilmente debido a que el desprendimiento de gases es mínimo y la concentración de calor se da en áreas pequeñas.

Las principales variables a las que se encuentra sometido el proceso GTAW son el voltaje del arco, la intensidad de corriente, la velocidad de soldado, el ángulo de afilado del electrodo así como el gas de protección utilizado.

Es posible calcular la cantidad de energía producida en el arco, ya que esta es proporcional a la intensidad de corriente y el voltaje aplicado.

La expresión que nos permite calcular el aporte térmico esta dado por Connors:

$$Q = \frac{(I \cdot V)}{S} \cdot 0.60 \quad (1)$$

Donde:

Q = Aporte térmico dado al material, expresado en kJ / mm.

V = Tensión o voltaje en el arco, expresado en Voltios.

I = Intensidad de corriente, expresado en Amperios.

S = Velocidad de formado del material, mm / min.

La constante de 0.60 es una constante de proporcionalidad no incorporada dentro de la ecuación de Connors.

De acuerdo a la AWS, la eficiencia de la transferencia de calor (el calor real transferido a la pieza de trabajo dividido por el calor total generado por la fuente calórica), para el proceso GTAW es superior al 88% por lo que no se considera necesario incorporar un factor de corrección a la ecuación, esto para uso practico.

De acuerdo al análisis realizado y al arreglo matemático empleado por Connors la cantidad de energía transferida por unidad de longitud es inversamente proporcional a la velocidad de soldado y la cantidad de energía producida en el arco es proporcional a la intensidad de corriente y al voltaje aplicado, si la intensidad de corriente controla la capacidad de penetración de la soldadura y esta intensidad puede afectar al voltaje del arco, si el voltaje se encuentra fijo es posible aumentar la intensidad del arco si la intensidad de corriente aumenta, debido a esto en algunos casos es necesario ajustar la intensidad del arco manteniendo fijo el valor de la intensidad de corriente y ajustando el valor del voltaje, esta característica depende del tipo de metal a soldar.

El proceso GTAW puede ser utilizado usando corriente directa o alterna, dependiendo en gran medida de las características del metal a soldar, en la figura 11 se muestran los arreglos mas comunes:

- Al utilizar corriente directa con el electrodo negativo (DCEN o DCSP), la penetración de la soldadura aumenta así como la velocidad de soldadura, este efecto aumenta cuando se utiliza helio como gas de protección.
- En el caso de la corriente alterna con el electrodo positivo (ACEP o ACDP), se genera una limpieza superficial de óxidos e impurezas al usar argón como gas de protección, el helio no permite dar esta limpieza.
- La corriente directa manteniendo al electrodo positivo es raramente utilizado, ya que el electrodo sufre un sobrecalentamiento que disminuye su capacidad termoiónica.

Tipo de Corriente	DCEN	DCEP	AC (BALANCEADO)
ELECTRODO	NEGATIVO	POSITIVO	
FLUJO DE ELECTRONES Y DE IONES			
CARACTERISTICAS DE PENETRACION			
ACCION DE LIMPIEZA DE OXIDOS	NO	SI	CADA MEDIO CICLO
BALANCE DE CALOR	70% METAL BASE 30% ELECTRODO	30% METAL BASE 70% ELECTRODO	50% METAL BASE 50% ELECTRODO
PENETRACION	EXCELENTE	POBRE	BUENA

Fig. 11. Tipos mas comunes de arreglos eléctricos en el proceso GTAW.

El voltaje utilizado en este proceso es el medido entre el electrodo y la pieza de trabajo, se le conoce comúnmente como el voltaje del arco, y su eficiencia depende de algunas variables como :

- Corriente del arco.
- Distancia entre el electrodo y la pieza de trabajo.
- Tipo de gas de protección,
- Forma y ángulo de la punta del electrodo.

La altura que separa al electrodo de la pieza de trabajo se conoce como longitud del arco y es de vital importancia porque afecta las características del metal fundido, principalmente en la longitud de la zona fundida y la estabilidad del arco eléctrico formado. En el soldado de láminas se desea que esta longitud sea la mínima posible.

Debido a la naturaleza eléctrica del arco, se podrían generar cortocircuitos si el electrodo se encuentra demasiado cerca del metal fundido, además de esto existe el riesgo de contaminación del electrodo por salpicaduras del metal fundido, esto afecta gravemente el tiempo de vida útil así como la eficiencia del electrodo.

❖ CORRIENTE DIRECTA

Es posible utilizar el electrodo de forma positiva o forma negativa. Generalmente en este tipo de corriente el electrodo es negativo (cátodo) por lo que el flujo de electrones sale del electrodo y los iones positivos son transferidos del metal base al electrodo; este arreglo se conoce como DCEN (Direct Current Electrode Negative).

Con el arreglo DCEN aproximadamente 70% del calor se concentra en el ánodo (metal base) y solo un 30 % en el cátodo (electrodo). La penetración es superior que en el DCEP (Direct Current Electrode Positive) en el que se genera una limpieza catódica sobre la superficie de material, el calor generado en este tipo de arreglos se concentra un 70% en el electrodo y un 30% en el metal base. En términos generales se considera que la eficiencia del arreglo del tipo DCEP es un décimo en comparación con el tipo DCEN

❖ CORRIENTE ALTERNA.

Es posible utilizar los dos arreglos mencionados, es decir electrodo positivo o negativo, con lo que se combina la característica de limpieza del electrodo positivo (ACEP) con la alta penetración del electrodo negativo (ACEN).

❖ ELECTRODOS

El proceso GTAW utiliza electrodos de tungsteno puro o aleados con Torio, Zirconio, Cerio o Lantano de acuerdo a la clasificación de la AWS, que se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Clasificación de electrodos para el proceso GTAW de acuerdo a la AWS

Tipo de electrodo	Especificación de acuerdo a la AWS	Código de Color
Tungsteno Puro	EWP	Gris
Tungsteno aleado con 1% de Torio (ThO_2)	EWTH1	Amarillo
Tungsteno aleado con 2% de Torio (ThO_2)	EWTH2	Rojo
Tungsteno aleado con 2% de Cerio (CeO_2)	EWCE2	NARANJA
Tungsteno aleado con 1% de Lantano (La_2O_3)	EWLa1	NEGRO
Tungsteno aleado con zirconio	EWZr	Café

Electrodos EWP.- Estos electrodos son de tungsteno puro (99.5%), no se encuentran aleados con ningún elemento. El rango de corriente que pueden soportar es bajo, en comparación con los electrodos aleados. Son usados generalmente en arreglos de tipo ACEP en la soldadura de aluminio y magnesio; en este tipo de arreglo los electrodos se utilizan con la punta redondeada (media esfera) lo que proporciona una buena estabilidad al arco formado.

También es posible utilizarlos en arreglo DCEN, pero la estabilidad del arco es deficiente y la iniciación del mismo difícil.

Electrodos EWTh.- Existen dos variaciones debido a la cantidad de Torio que puede variar del uno y dos por ciento, Ver tabla 7. La presencia de Torio incrementa la capacidad termoiónica del tungsteno, lo que aumenta el rango operativo de corriente sin presentar falla así como la capacidad de corriente a la que puede ser sometido el electrodo y la vida útil del mismo. La iniciación del arco es fácil y se produce un arco estable. Estos electrodos son los mas comúnmente utilizados y son superiores a los demás en la mayoría de los aspectos. El Torio es un elemento de bajo nivel radioactivo que no representa un gran riesgo a la salud, por lo que las medidas de seguridad que deben de ser tomadas son mínimas. Estos electrodos fueron diseñados para aplicaciones con arreglos del tipo DCEN con la punta del electrodo afilada (Tip Angle), lo que proporciona una mayor penetración en la soldadura. Este ángulo es específico para cada proceso, existe un rango que va desde los 15 a 180 Grados. No es recomendable utilizar arreglos del tipo ACEP o ACEN, ya que es muy difícil mantener la punta semiesférica del electrodo.

Electrodos EWCe.- Fueron desarrollados a mediados de los 80's pensando en la sustitución de los electrodos con torio. La ventaja que presentan esto electrodos aleados con cerio es que, comparados con los anteriores, su rango de vaporización es menor y pueden ser usado con los dos tipos de arreglos principales.

Electrodos EWLa.- Estos electrodos, aleados con lantano, fueron desarrollados al mismo tiempo que los aleados con cerio, presentan las mismas características.

Electrodos EWZr.- Están aleados con zirconio, se utilizan, principalmente, en arreglos del tipo ACEN o ACEP. Combinan la estabilidad del arco con la punta de electrodo semiesférica y la resistencia a la contaminación; además presentan una buena estabilidad en el arco.

La configuración de la punta del electrodo en el proceso GTAW, se considera como una variable dentro del proceso. En arreglos del tipo ACEP es preferible que el electrodo termine en una forma semiesférica mientras que en arreglos del tipo DCEN es necesario que el electrodo presente una punta cónica. En la Fig. 12 se ejemplifica esto.

El ángulo de afilado es específico para cada proceso por lo que debe de ser estudiado y encontrado de la operación de soldadura, la geometría de la punta de electrodo influye en la penetración de la soldadura y en la longitud del cordón .

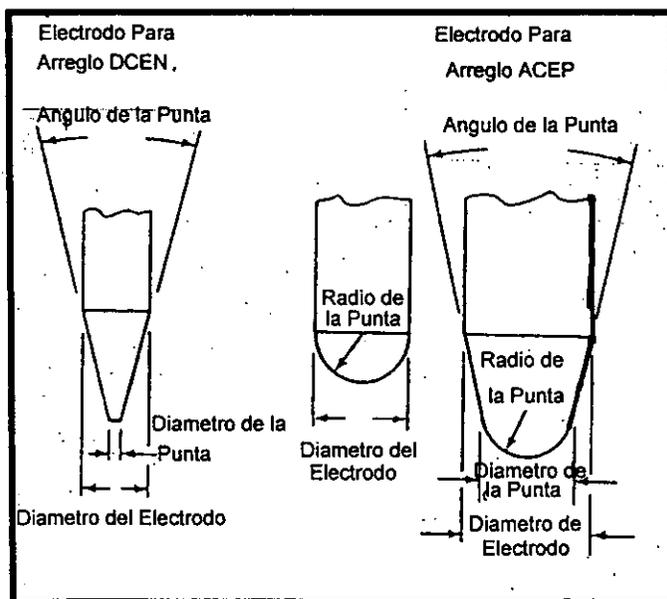


Fig. 12. Geometría de la punta del electrodo en el proceso GTAW.

Los electrodos presentan tamaños y diámetros de acuerdo a las especificaciones de la AWS, los cuales corresponden a:

Longitud: 3, 6, 7, 8 y 24 pulgadas,

Diámetro: 0.1, 0.2, 0.4, 1/16, 3/32, 1/8, 5/32, 3/16 y 1/4 de pulgada.

La selección adecuada del tipo de electrodo a utilizar depende principalmente del tipo de corriente y al arreglo eléctrico al que va a estar sometido. Un exceso en la capacidad máxima de corriente origina la erosión del electrodo, un sobrecalentamiento dañino y disminución en su capacidad termoiónica originando falta de penetración en la soldadura aun cuando la intensidad de corriente se aumente.

Con baja corriente se provoca que el arco sea inestable, la tabla 8 muestra los rangos de corriente sugeridos para cada electrodo así como el tipo de arreglo recomendado por la AWS.

Tabla 8. Corrientes de soldadura recomendadas para diferentes diámetros de electrodos.

DIÁMETRO DEL ELECTRODO (pulgadas)	CORRIENTE DE SOLDADURA EN ARREGLOS DEL TIPO DCEN b(amperes)	CORRIENTE DE SOLDADURA EN ARREGLOS DEL TIPO DCEP b(amperes)	CORRIENTE DE SOLDADURA EN ARREGLOS DEL TIPO ACEN c(amperes)	CORRIENTE DE SOLDADURA EN ARREGLOS DEL TIPO ACEP c(amperes)
0.010	MAYOR A 15	-----	MAYOR A 15	MAYOR A 15
0.020	5-20	-----	5-15	10-20
0.040	15-80	-----	10-60	20-30
1/16	70-150	10-20	50-100	30-80
3/32	150-250	15-30	100-160	60-130
1/8	250-400	25-40	150-210	100-180
5/32	400-500	40-55	200-275	160-240
3/16	500-750	55-80	250-350	190-300
1/4	750-1100	80-125	325-450	325-450

Todos los valores son obtenidos utilizando Argón como gas de protección.

b Valores obtenidos usando electrodos EWTH2

c Valores obtenidos usando electrodos EWP.

Esta tabla es una guía para el uso de las diferentes corrientes de soldadura que pueden ser empleadas. Las condiciones exactas de corriente para cada proceso deben ser determinadas de acuerdo a proceso.

INDICE

❖ Introducción	Pag. 1
----------------	--------

CAPITULO UNO

Proceso de Formado de Tubería de Acero Inoxidable Con costura	Pag. 2 a 8
--	------------

CAPITULO DOS

Aceros Inoxidables	Pag. 9 a 13
❖ Aceros Inoxidables Austeníticos	Pag. 14
❖ Precipitación de Carburos	Pag. 16
❖ Aceros Inoxidables Ferríticos	Pag. 19

CAPITULO TRES

Soldadura	Pag. 22 a 26
❖ Soldadura de los Aceros Inoxidables Austeníticos	Pag. 28
❖ Soldadura de los Aceros Inoxidables Ferríticos	Pag. 29
❖ Proceso TIG y/o GTAW	Pag. 30
❖ Fundamentos del Proceso	Pag. 32

CAPITULO CUATRO

Diseño Experimental	Pag. 40
❖ Diagnostico de las condiciones de operación	Pag. 40
❖ Ajuste preeliminar en base al aporte termico, de Los parámetros operativos para cada caso especifico	Pag. 41

- ❖ Aumento en la velocidad de formado de Tubería Pag. 44
- ❖ Afilado de electrodo Pag. 45
- ❖ Cambio de tamaño en el electrodo Utilizado Pag. 46

CAPITULO CINCO

- Resultados y discusión Pag. 47
- ❖ Primera Fase Pag. 47
- ❖ Segunda Fase Pag. 47
- ❖ Tercera Fase Pag. 52
- ❖ Cuarta Fase Pag. 66
- ❖ Quinta Fase Pag. 71

CAPITULO SEIS

- CONCLUSIONES Pag. 72
- ❖ Bibliografía Pag. 73

❖ VALIDACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN PROPUESTOS.

Debido a que se trata de un proceso continuo de soldadura longitudinal, el tiempo para las pruebas era limitado. La experimentación se realizaba preferentemente dos y medio metro antes del paso de la unión de punta y cola de la bobina, o, en determinados casos, en pequeños tramos de tubería (aproximadamente 6 metros) Una vez que el tramo experimental era unido, se restablecían las condiciones normales, retirando el tramo experimental del molino para ser analizado.

El tubo formado bajo condiciones experimentales se somete a pruebas de control de calidad de acuerdo a la norma de fabricación, una vez segmentada en diferentes longitudes, para determinar propiedades y detectar posibles fallas en la soldadura, las pruebas a las que se somete el material son:

1.- Mecánicas. En la mayoría de los casos el material se lleva hasta la fractura o hasta la capacidad límite de la máquina.

La detección de fallas se hace visualmente. Se muestrea cada tres a cinco tubos fabricados. Las pruebas que se realizan son:

Expansión.- Consiste en tomar un segmento de tubo (aproximadamente 30 cm) y expandirlo a un 25% generalmente, en algunos casos se puede dar una expansión mayor.

Abocinado.- El tubo es deformado por medio de una prensa hidráulica sobre un cono metálico, lográndose una deformación mayor que en la expansión.

Aplastamiento.- Se aplasta el tubo sobre la línea de soldadura por medio de una prensa hidráulica.

Aplastamiento invertido.- es idéntico al aplastamiento, pero en dirección contraria. Todas estas pruebas tiene como fin la detección de fallas en el cordón de soldadura, obtenidas las muestras para el departamento de control de calidad, se destinan segmentos para análisis microestructural.

2.- Metalográficas. Se tomaron dos muestras por cada turno de trabajo,

Macrográfico.- Se selecciona un segmento de la zona de soldadura y se le da un decapado rápido que permite observar la penetración de la soldadura, forma y el tamaño del cordón. En algunos casos se tomaban muestras intermedias, haciendo un decapado en línea para observar el cordón de soldadura.

Micrográfico.- Se toman como muestras pequeños tramos de la zona de interés del tubo de, aproximadamente, 5 cm de longitud y se preparan para su observación en el microscopio óptico, en el análisis metalografico realizado se determina tamaño de grano, longitud del cordón de soldadura, tamaño de la zona afectada por calor así como la existencia de defectos como microfractura, corrosión intercrystalina, falta de penetración.

Las determinaciones metalograficas se realizaron de acuerdo a la norma ASTM y se utilizaron tres tipos de reactivos de ataque, para los aceros inoxidable ferríticos se utilizó el reactivo de ataque Vilella, mientras que para los austeníticos ácido oxálico y agua regia, de estos tres reactivos el ataque con ácido oxalico es de tipo electrolítico mientras que los dos restantes son por inmersión.

Si la tubería formada con estos nuevos parámetros superaba las pruebas de control de calidad de la norma bajo la cual se estaba fabricando, se montaban en línea, teniendo el operador que respetar el rango suministrado para su fabricación, bajo consigna de que a cualquier problema que se presentara se volvería al procedimiento anterior de fabricación.

3. AUMENTO EN LA VELOCIDAD DE FORMADO DE TUBERIA.

El aumento en la velocidad de formado es un punto crucial para la compañía ya que permite aumentar la productividad y la eficiencia de la línea; a mayor velocidad mayor producción de tubería.

Las tablas de los parámetros óptimos de operación, en función del aporte térmico, permiten mantener bajo control las características del proceso lo que da oportunidad de realizar modificaciones en la velocidad de formado de tubería, de acuerdo a la expresión de aporte térmico Ec. 1 si se produce un aumento en la velocidad de formado, el valor del aporte térmico disminuye lo que indica que si existe un aumento en la velocidad, es necesario aplicar una mayor cantidad de energía para mantener el nivel del aporte térmico que permita mantener las características deseadas en la soldadura. Con la ayuda de la Ec. 2, es posible obtener el valor de aporte térmico modificado con respecto al aumento de velocidad.

$$Q_m = \frac{(S_f \cdot Q_o)}{S_o} \quad (2)$$

Donde

Q_m . = Aporte térmico modificado,

Q_o . = Aporte térmico original,

S_f . = Velocidad final de soldado

S_o = Velocidad inicial de soldado

El aumento en el aporte térmico de acuerdo a las consideraciones hechas solamente puede ser realizado aumentando el valor de la intensidad de corriente.

Esto una vez que se ha obtenido el valor del aporte térmico modificado de acuerdo a la ec. 2.

Por lo anterior es necesario encontrar la intensidad de corriente, ya que el valor del voltaje permanece prácticamente constante porque la separación entre el electrodo y el metal base (altura), no se modifica.

El valor numérico se calcula de la misma forma que en la etapa anterior, basándose en el aporte térmico modificado a la nueva velocidad de formado.

4. AFILADO DE ELECTRODO.

La cuarta etapa de esta experimentación consiste en tratar de aumentar la penetración y reducir tanto la zona afectada por el calor como el ancho del cordón de soldadura. Se siguen las recomendaciones hechas por la AWS con respecto al ángulo que es necesario dar a la punta del electrodo, entre 30 y 60°. En el proceso ASPE los electrodos están sujetos a arreglos del tipo DCSP (DCEN), es decir se alimentan de corriente directa y presentan polaridad negativa, el diámetro del electrodo usado es de 1/8 ".

El aumento de la penetración se da bajo las mismas condiciones de operación, es decir, sin aumentar los niveles de consumo de energía, esto se debe a que el área del jet de plasma formado disminuye originando que la concentración de calor se de en una menor área, en algunos casos es posible disminuir los niveles de energía utilizados. Esto se considera benéfico ya que, además de reducir los niveles de esfuerzos producidos por la operación de soldado, se involucra una reducción conjunta de la zona afectada por calor y del tamaño del cordón de soldadura.

El afilado se da por esmerilado manual, de manera tal que las ralladuras ocasionadas vayan en la misma dirección que el flujo de los electrones para no provocar interferencias en el flujo de estos. Debido a que los electrodos son muy frágiles, esta operación debe ser realizada con gran cuidado para evitar que se fracturen o queden rebabas en la punta que den lugar a contaminación en el metal fundido originando concentradores de esfuerzos que puedan producir falla por agrietamiento.

El electrodo afilado a diferentes ángulos se prueba en línea con los parámetros operativos óptimos, repitiendo la metodología de pruebas mecánicas de control de calidad y analizando macroscópicamente y microscópicamente las variaciones sufridas en el tamaño y forma del cordón de soldadura, zona afectada por calor y penetración.

5. CAMBIO DE TAMAÑO EN EL ELECTRODO UTILIZADO

En base a la modificación realizada en la punta del electrodo y a que ya no es posible reducir el tamaño del cordón y la zona afectada por calor con las condiciones planteadas, se propone un cambio en el tamaño del electrodo por lo que se propuso una reducción en el tamaño del mismo.

Esto es factible solo si el electrodo puede resistir el rango de corriente al que va estar sometido. De acuerdo a la tabla 8 es posible sustituir el electrodo de 1/8", que es el electrodo normal en el proceso, por otro de 3/32, realizando algunas modificaciones en el consumo de energía, esto se puede realizar ya que se ha observado que la penetración aumenta por el efecto de concentrar el calor del jet de plasma en áreas menores.

Los nuevos valores de los parámetros operativos se calculan basados en una disminución del 20 por ciento en el aporte térmico y se recalcula el valor de la intensidad de corriente, con las consideraciones tomadas en los puntos anteriores (2 y 3).

Si se compara la forma tradicional contra lo observado en la micrografía de la fig.16, es apreciable la deformación realizada a la apertura de la copa de vino.

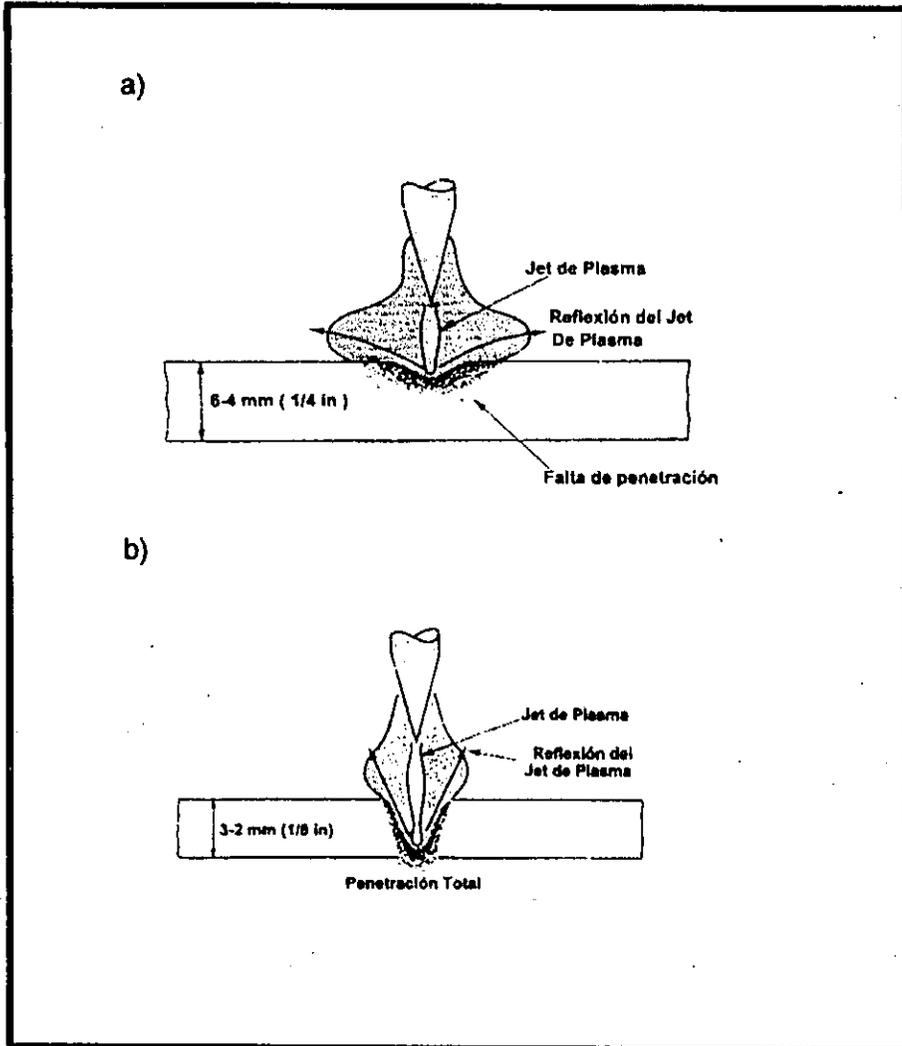
Fig. 17. Detalle de la deformación en la copa de la soldadura GTAW.



La terminación del electrodo en punta y con el ángulo de 42° sólo es válido para la soldadura de calibres delgados, ésto es 18, 20 y 22, ya que al tratar de utilizar este mismo afilado para soldar material en los calibres 16, 14 y cédula 10 y 40, no se pudo dar la penetración necesaria al material aun aumentando el aporte térmico. Al analizar las muestras del material que no pudo ser soldado, se observó una gran fusión en la zona superior y una penetración pobre o casi nula en la mayoría de las muestras tratadas. Esto se debe a un fenómeno conocido como reflexión del arco o del jet de plasma, es decir que debido a que existe una gran cantidad de material parcialmente fundido, el jet de plasma formado es rebotado por el mismo material lo que ocasiona que solamente se funda mas material en la parte superior, provocando una mínima o nula penetración, Obviamente esto es inaceptable en la tubería.

La reflexión del arco se puede apreciar con mayor claridad en la Fig.18, a) Falta de penetración en la soldadura debido a la reflexión del arco, b) Penetración normal en la soldadura, reflexión del arco mínima.

Fig. 18. Reflexión del Jet de plasma en la soldadura GTAW.



La solución encontrada a este problema consistió en proporcionar el mismo ángulo de afíle al electrodo pero la terminación del electrodo se dejó roma. Con esta modificación se logró dar la penetración necesaria al material, manteniendo baja la longitud de la zona soldada así como de la ZAC.

Los tamaños de la zona soldada y de la ZAC disminuyeron, en la tabla 9 se muestran algunos de estos datos.

Tabla 9. Longitud promedio de la zona de soldadura.

Muestra	Material	Tipo de Acero	ZAC (mm)	Cordón (mm)	Cordón + ZAC (mm)
1	Ced 40	304	1.2023	4.503	5.7053
2	Cal 14	409	0.9056	4.221	5.1268
3	cal 18	409	0.5025	3.532	4.0345
4	cal 16	304	0.534	3.853	4.117

Durante la experimentación se corrieron diferentes tipos de tubería, por lo que es necesario hablar de reducciones promedio para los diferentes tipos de afilado empleados. La reducción máxima en promedio de la zona afectada por calor y cordón de soldadura, considerando los tamaños promedio que se manejan en planta, contra los experimentales obtenidos fue:

Electrodo con la punta roma

- a) Acero austenítico: 25%,
- b) Acero ferrítico: 29.8%.

Electrodo con terminación en punta

- a) Acero austenítico: 32.35%,
- b) Acero ferrítico: 39.25%.

Esta reducción de la ZAC y cordón de soldadura presenta un mayor beneficio en los aceros del tipo ferrítico ya que la fragilidad de la unión se minimiza, mientras que en el caso de los aceros austeníticos no se aprecia una modificación sensible en las características metal-mecánicas.

El tamaño de grano disminuye con la reducción en aporte térmico.

Las condiciones de enfriamiento a las que se somete el material después de pasar por el paso soldador son muy variables, por lo cual no es posible cuantificar con certeza la reducción promedio para los diferentes materiales, sólo podemos decir que proporciona mejores propiedades a la soldadura, si asociamos esto con la reducción en la longitud del cordón y de la ZAC, las propiedades del material mejoran.

Lo anterior se observó en línea, ya que las pruebas mecánicas realizadas a los diferentes materiales superaron el control de calidad del proceso y en el caso del material fabricado con acero 409 la prueba de expansión soporto deformaciones superiores al 25% en promedio.

Además del análisis metalográfico, se obtuvo el perfil de microdureza Vickers sobre la superficie transversal de la tubería, encontrando que no existe una variación significativa en dureza en materiales que han sido soldados con electrodos afilados a 42° y los normales de proceso (de 2 unidades de dureza máximo); el metal base presentó un promedio de 115-117 HV, la zona afectada por calor de 105 - 108 y en el cuerpo de la soldadura este valor disminuía hasta 98 - 103.

Con este análisis se corrobora que la reducción en la ZAC y cordón de soldadura son mas benéficos para un material del tipo ferrítico.

En la última fase de la experimentación se planteó la posibilidad de reducir en una mayor proporción el tamaño de la zona afectada por calor y la zona de soldadura, cambiando el electrodo normal de proceso, EWTH 2, de 1/8" de diámetro por uno de 3/32 ". Se creó un rango con una reducción del 20% en el aporte térmico, necesario para el valor de corriente que puede soportar el electrodo de 3/32". Al hacer la prueba con tubería de 1/2" ϕ en calibre 20, acero tipo 304, las características de la soldadura eran apenas aceptables: pérdidas de penetración recurrentes, un excesivo desgaste de la punta del electrodo y soldadura desviada a todo lo largo del material. Esto se debe a que la amplitud de la columna del arco es menor en comparación con la que se forma en el electrodo de 1/8".

Como el material formado es muy pequeño, se presenta un pequeño movimiento que motiva que la unión del material (junta) en el paso soldador no sea exactamente la misma durante la operación de soldadura; esto, conjuntado con la amplitud del arco formado con este electrodo, origina que la soldadura no se realice adecuadamente sobre la junta del material.

Por lo anterior la prueba de cambio de electrodo no es aceptable ya que la tubería obtenida, no cumple con los requerimientos de calidad en soldadura, ni soporta las pruebas mecánicas de acuerdo a los requerimientos de la norma.

No es posible cuantificar el efecto del cambio de electrodo propuesto, ya que no se realizaron más pruebas debido a el movimiento de la junta en el paso soldador que origina una soldadura no aceptable de acuerdo al criterio de calidad.

En la tercera fase de la experimentación se muestran los rangos obtenidos con el aumento de velocidad. El calculo de los valores de intensidad de corriente así como la implantación de estos parámetros en línea siguió la misma metodología que la etapa anterior.

1B.- PRODUCTO: 3/4"Ø, Cédula 10, Acero 304. Norma de fabricación: A-312

A. Térmico (kJ/mm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	Vel. (mm/min)
4.02	275.80	17.5	720
4.09	279.00	17.6	720
4.16	282.17	17.7	720
4.23	285.31	17.8	720
4.30	288.41	17.9	720
4.37	291.47	18	720
4.44	294.50	18.1	720
Flujo gas cámara externa en SCFH		30	
Flujo gas cámara interna en SCFH		2.5	

2B.- PRODUCTO: 2"Ø, Calibre 18, Acero 304. Norma de fabricación: A-554

A. Térmico (kJ/mm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	Vel. (mm/min)
2.80	243.02	17.3	900
2.87	247.66	17.4	900
2.94	252.24	17.5	900
3.01	256.78	17.6	900
3.08	261.26	17.7	900
3.15	265.69	17.8	900
3.22	270.07	17.9	900
Flujo gas cámara externa en SCFH		27	
Flujo gas cámara interna en SCFH		3	

3B.- PRODUCTO: 1,1/2" Ø, Calibre 19, Acero 409L. Norma de fabricación: Ingria 003-90

A. Térmico (kJ/mm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	Vel. (mm/min)
1.05	183.19	11.5	1200
1.12	193.68	11.6	1200
1.19	203.99	11.7	1200
1.26	214.12	11.8	1200
1.33	224.09	11.9	1200
1.40	233.89	12	1200
1.47	243.53	12.1	1200
Flujo gas cámara externa en SCFH		28	
Flujo gas cámara interna en SCFH		3	

4B.- PRODUCTO: 1 1/2"Ø, Calibre 18, Acero 304L. Norma de fabricación: A-554

A. Térmico (kJ/mm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	Vel. (mm/min)
1.31	188.79	12.7	1100
1.38	197.34	12.8	1100
1.45	205.76	12.9	1100
1.52	214.05	13	1100
1.59	222.21	13.1	1100
1.66	230.25	13.2	1100
1.73	238.16	13.3	1100
Flujo gas cámara externa en SCFH		30	
Flujo gas cámara interna en SCFH		2.5	

5B.- PRODUCTO: 1 5/8" Ø, Calibre 16, Acero 304. Norma de fabricación: A-554

A. Térmico (kJ/mm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	Vel. (mm/min)
2.08	240.89	14.1	980
2.15	247.24	14.2	980
2.22	253.51	14.3	980
2.29	259.69	14.4	980
2.36	265.78	14.5	980
2.43	271.79	14.6	980
2.50	277.72	14.7	980
Flujo gas cámara externa en SCFH		26	
Flujo gas cámara interna en SCFH		3	

6B.- PRODUCTO: 1"Ø, Calibre 14, Acero 304. Norma de fabricación: A-554

A. Térmico (kJ/mm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	Vel. (mm/min)
2.31	257.14	13.5	900
2.38	262.97	13.6	900
2.45	268.72	13.7	900
2.52	274.38	13.8	900
2.59	279.96	13.9	900
2.66	285.46	14	900
2.73	290.88	14.1	900
Flujo gas cámara externa en SCFH			25
Flujo gas cámara interna en SCFH			4

7B.- PRODUCTO: 1 1/2" Ø, Calibre 14, Acero 409L, Norma de fabricación Ingria 003-90

A. Térmico (kJ/mm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	Vel. (mm/min)
2.44	259.98	13.3	850
2.51	265.44	13.4	850
2.58	270.82	13.5	850
2.65	276.12	13.6	850
2.72	281.34	13.7	850
2.79	286.49	13.8	850
2.86	291.56	13.9	850
Flujo gas cámara externa en SCFH			28
Flujo gas cámara interna en SCFH			2.7

8B.- PRODUCTO: 4 1/2" Ø, Calibre 16, Acero 304. Norma de fabricación A-554

A. Térmico (kJ/mm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	Vel. (mm/min)
2.52	257.23	13.9	850
2.59	262.47	14	850
2.66	267.64	14.1	850
2.73	272.74	14.2	850
2.80	277.77	14.3	850
2.87	282.73	14.4	850
2.94	287.62	14.5	850
Flujo gas cámara externa en SCFH			30
Flujo gas cámara interna en SCFH			2.5

COMPARATIVO DE RANGOS DE OPERACIÓN OBSERVESE LAS DIFERENCIAS EN LA VELOCIDAD DE FORMADO Y EL FLUJO DE GAS DE PROTECCION

1A.- PRODUCTO: 3/4"Ψ, Cédula 10, Acero 304, Norma de fabricación: A-312

A. Térmico (kJ/mm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	Vel. (mm/min)
3.24	189.82	16.5	600
3.31	199.40	16.6	600
3.38	202.40	16.7	600
3.45	205.36	16.8	600
3.52	208.28	16.9	600
3.59	211.18	17	600
3.66	214.04	17.1	600
Flujo gas cámara externa en SCFH			28.5
Flujo gas cámara interna en SCFH			3.5

1B.- PRODUCTO: 3/4"Ψ, Cédula 10, Acero 304, Norma de fabricación: A-312

A. Térmico (kJ/mm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	Vel. (mm/min)
4.02	275.80	17.5	720
4.09	279.00	17.6	720
4.16	282.17	17.7	720
4.23	285.31	17.8	720
4.30	288.41	17.9	720
4.37	291.47	18	720
4.44	294.50	18.1	720
Flujo gas cámara externa en SCFH			30
Flujo gas cámara interna en SCFH			2.5

2A.- PRODUCTO: 2"Ψ, Calibre 18, Acero 304, Norma de fabricación: A-554

A. Térmico (kJ/mm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	Vel. (mm/min)
2.18	155.08	16.4	700
2.25	159.09	16.5	700
2.32	163.05	16.6	700
2.39	166.97	16.7	700
2.46	170.83	16.8	700
2.53	174.65	16.9	700
2.6	178.43	17	700
Flujo gas cámara externa en SCFH			25
Flujo gas cámara interna en SCFH			5

2B.- PRODUCTO: 2"Ψ, Calibre 18, Acero 304, Norma de fabricación: A-554

A. Térmico (kJ/mm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	Vel. (mm/min)
2.80	243.02	17.3	900
2.87	247.66	17.4	900
2.94	252.24	17.5	900
3.01	256.78	17.6	900
3.08	261.26	17.7	900
3.15	265.69	17.8	900
3.22	270.07	17.9	900
Flujo gas cámara externa en SCFH			27
Flujo gas cámara interna en SCFH			3

COMPARATIVO DE RANGOS DE OPERACIÓN OBSERVE LAS DIFERENCIAS EN LA VELOCIDAD DE FORMADO Y EL FLUJO DE GAS DE PROTECCIÓN.

3A.- PRODUCTO: 1.1Z⁺ Calibre 19, Acero 409L, Norma de fabricación: Inicia 003-90

3B.- PRODUCTO: 1.1Z⁺ Calibre 19, Acero 409L, Norma de fabricación: Inicia 003-90

A. Térmico (kJ/mm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	Vel. (mm/min)
0.72	100.93	10.7	900
0.79	109.72	10.8	900
0.86	118.35	10.9	900
0.93	126.82	11	900
1	135.14	11.1	900
1.07	143.30	11.2	900
1.14	151.33	11.3	900
Flujo gas cámara externa en SCFH			25
Flujo gas cámara interna en SCFH			5

4A.- PRODUCTO: 1.1Z⁺ Calibre 18, Acero 304L, Norma de fabricación: A-554

A. Térmico (kJ/mm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	Vel. (mm/min)
1.07	138.36	11.60	900
1.14	146.15	11.70	900
1.21	153.81	11.80	900
1.28	161.34	11.90	900
1.35	168.75	12.00	900
1.42	176.03	12.10	900
1.49	183.20	12.20	900
Flujo gas cámara externa en SCFH			28.5
Flujo gas cámara interna en SCFH			3.5

4B.- PRODUCTO: 1.1Z⁺ Calibre 18, Acero 304L, Norma de fabricación: A-554

A. Térmico (kJ/mm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	Vel. (mm/min)
1.05	183.19	11.5	1200
1.12	193.68	11.6	1200
1.19	203.99	11.7	1200
1.26	214.12	11.8	1200
1.33	224.09	11.9	1200
1.40	233.89	12	1200
1.47	243.53	12.1	1200
Flujo gas cámara externa en SCFH			28
Flujo gas cámara interna en SCFH			2.5

A. Térmico (kJ/mm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	Vel. (mm/min)
1.31	188.79	12.7	1100
1.38	197.34	12.8	1100
1.45	205.76	12.9	1100
1.52	214.05	13	1100
1.59	222.21	13.1	1100
1.66	230.25	13.2	1100
1.73	238.16	13.3	1100
Flujo gas cámara externa en SCFH			30
Flujo gas cámara interna en SCFH			2.5

COMPARATIVO DE RANGOS DE OPERACIÓN OBSERVESE LAS DIFERENCIAS EN LA VELOCIDAD DE FORMADO Y EL FLUJO DE GAS DE PROTECCIÓN.

5A - PRODUCTO: 1 5/8" φ, Calibre 16, Acero 304, Norma de fabricación: A-554

5B - PRODUCTO: 1 5/8" φ, Calibre 16, Acero 304, Norma de fabricación: A-554

A. Térmico (kJ/mm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	Vel. (mm/min)
1.74	178.8	13.3	820
1.81	184.6	13.4	820
1.89	191.33	13.5	820
1.96	196.96	13.6	820
2.03	202.51	13.7	820
2.1	207.97	13.8	820
2.17	213.36	13.9	820
Flujo gas cámara externa en SCFH			22
Flujo gas cámara interna en SCFH			5

A. Térmico (kJ/mm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	Vel. (mm/min)
2.08	240.89	14.1	980
2.15	247.24	14.2	980
2.22	253.61	14.3	980
2.29	259.69	14.4	980
2.36	265.78	14.5	980
2.43	271.79	14.6	980
2.50	277.72	14.7	980
Flujo gas cámara externa en SCFH			28
Flujo gas cámara interna en SCFH			3

6A - PRODUCTO: 1" φ, Calibre 14, Acero 304, Norma de fabricación: A-554

A. Térmico (kJ/mm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	Vel. (mm/min)
1.8	170.44	12.8	700
1.94	175.45	12.9	700
2.01	180.38	13	700
2.08	185.24	13.1	700
2.15	190.03	13.2	700
2.22	194.74	13.3	700
2.29	199.38	13.4	700
Flujo gas cámara externa en SCFH			20
Flujo gas cámara interna en SCFH			6

6B - PRODUCTO: 1" φ, Calibre 14, Acero 304, Norma de fabricación: A-554

A. Térmico (kJ/mm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	Vel. (mm/min)
2.31	257.14	13.5	900
2.38	262.97	13.6	900
2.45	268.72	13.7	900
2.52	274.38	13.8	900
2.59	279.96	13.9	900
2.66	285.46	14	900
2.73	290.88	14.1	900
Flujo gas cámara externa en SCFH			25
Flujo gas cámara interna en SCFH			4

COMPARATIVO DE RANGOS DE OPERACIÓN OBSERVE LAS DIFERENCIAS EN LA VELOCIDAD DE FORMADO Y EL FLUJO DE GAS DE PROTECCIÓN.

7A.- PRODUCTO: 1 1/2" φ, Calibre 14, Acero 409L, Norma de fabricación Ingría 003-90

B.- PRODUCTO: 1 1/2" φ, Calibre 14, Acero 409L, Norma de fabricación Ingría 003-90

2.440714286

A. Térmico (kJ/mm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	Vel. (mm/min)
2.01	189.11	12.4	700
2.08	194.13	12.5	700
2.15	199.07	12.6	700
2.22	203.94	12.7	700
2.29	208.72	12.8	700
2.36	213.44	12.9	700
2.43	218.08	13	700
Flujo gas cámara externa en SCFH			24
Flujo gas cámara interna en SCFH			4

A. Térmico (kJ/mm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	Vel. (mm/min)
2.44	259.98	13.3	850
2.51	265.44	13.4	850
2.58	270.82	13.5	850
2.65	276.12	13.6	850
2.72	281.34	13.7	850
2.79	286.49	13.8	850
2.86	291.56	13.9	850
Flujo gas cámara externa en SCFH			28
Flujo gas cámara interna en SCFH			2.7

8A.- PRODUCTO: 4 1/2" φ, Calibre 16, Acero 304, Norma de fabricación A-554

3A.- PRODUCTO: 4 1/2" φ, Calibre 16, Acero 304, Norma de fabricación A-55-

A. Térmico (kJ/mm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	Vel. (mm/min)
1.93	160.83	13	650
2	165.39	13.1	650
2.07	169.82	13.2	600
2.14	174.25	13.3	600
2.21	178.68	13.4	600
2.28	183.11	13.5	600
2.35	187.54	13.6	600
Flujo gas cámara externa en SCFH			28.5
Flujo gas cámara interna en SCFH			3.5

A. Térmico (kJ/mm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	Vel. (mm/min)
2.52	257.23	13.9	850
2.59	262.47	14	850
2.66	267.64	14.1	850
2.73	272.74	14.2	850
2.80	277.77	14.3	850
2.87	282.73	14.4	850
2.94	287.62	14.5	850
Flujo gas cámara externa en SCFH			30
Flujo gas cámara interna en SCFH			2.5

El aumento realizado a la velocidad de formado y por tanto a la capacidad de soldado, se realizo de manera gradual, los resultados obtenidos corresponden a incrementos de velocidad de 25% en promedio. El máximo aumento fue de 82% y el mínimo de 15%.

Las variaciones en el amperaje no son mayores a 100 amperes entre un rango a velocidad normal y uno modificado, en el voltaje las variaciones son mínimas ya que la separación entre el metal base y el electrodo no varia, mientras que en el aporte térmico la variación promedio entre los rangos es en promedio de 0.35 KJ/mm, siendo la máxima variación de 0.89 KJ/mm.

Las velocidades desarrolladas en los molinos presentan como limitante la capacidad del electrodo, ya que al utilizar los electrodos EWTH2 de 1/8" de diámetro, de acuerdo a la tabla 7, la máxima intensidad de corriente recomendada es de 350 amperes, a mayor intensidad se presentan problemas de desgaste y perdida en la capacidad termoionica del electrodo. Además de esto se considera que la máxima velocidad que pueden desarrollar los molinos se encuentra cercana a los 2 m/min., por lo que se recomienda trabajar con velocidades menores a los 1.5 m/min, por cuestiones de seguridad de equipo.

Se muestra un cuadro comparativo, donde se observa claramente la diferencia entre los rangos de operación y su subsecuente modificación con el incremento de velocidad, se observa que en los casos donde se incremento la velocidad de formado el flujo de gases en la cámara exterior aumento en un promedio de 25%, esto se puede explicar ya que el flujo de gases cumple dos funciones en la soldadura GTAW, siendo la principal la de formar una zona de protección en el área de soldadura y la segunda la de formar el plasma en el arco, a mayor velocidad de formado se necesita que la penetración sea mas rápida lo que implica un aumento en el flujo de gas en la cámara exterior, este aumento en el flujo propicia mayor disociación en el arco, aumentando el calor generado, además de imprimir una mayor velocidad al jet de plasma que genera una mayor capacidad de penetración, la disminución en el flujo de gas en la cámara interior se realiza para evitar problemas en la soldadura interior, ya que la presión

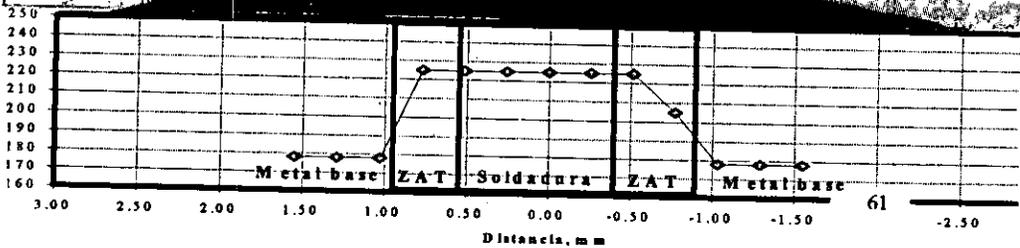
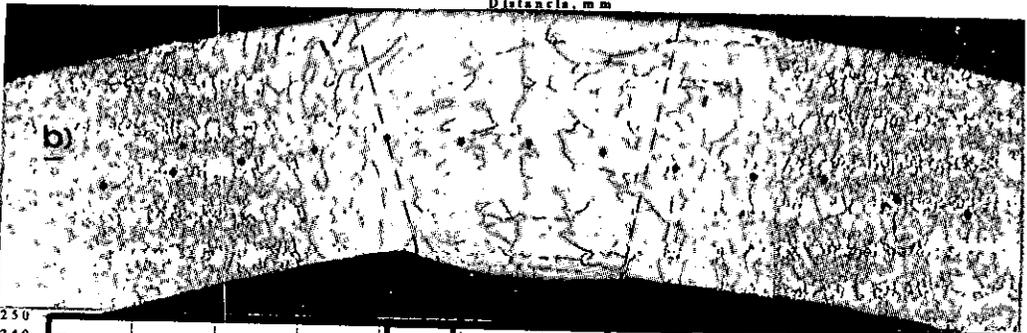
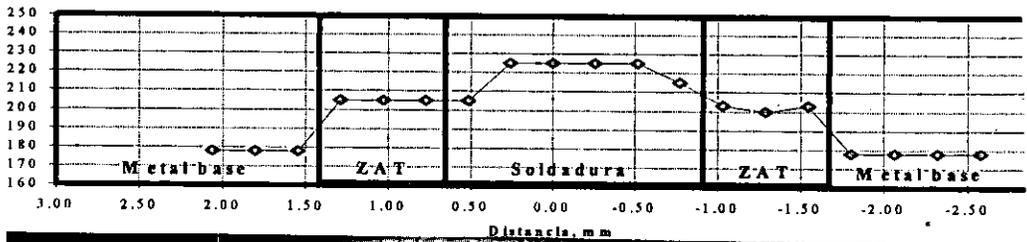
generada propicia que el metal fundido sea empujado hacia la superficie, originando el socavado de la soldadura interior.

En el aspecto metalúrgico se observa una disminución en el tamaño de la zona afectada por calor y del cordón de soldadura, si el tamaño de grano se encuentra ligado al aporte térmico es posible controlar parcialmente el tamaño en la zona de soldadura por medio del aporte térmico, el tamaño de grano en el cuerpo de la soldadura disminuye en los aceros ferríticos aunque continua manteniendo las características de granos alargados hacia el centro de la soldadura, en los aceros austeníticos se observa una disminución en el espaciamiento interdendrítico.

La reducción del tamaño de grano se puede observar en las micrografías de la fig. 13. que corresponde a un acero ferrítico del tipo 409L:

- a) Material formado a un aporte térmico de 0.629 KJ/mm donde se observa un tamaño de grano en la soldadura de 5.7 ASTM, es de remarcar la característica de granos alargados en el centro del cordón de soldadura, la extensión de la ZAC que es de 3 mm; se advierten las indentaciones realizadas para obtener el perfil de dureza en el cuerpo de la soldadura, no se aprecia con claridad el aumento gradual de la misma debido a que la ZAC no se encuentra claramente definida.
- b) En este caso el aporte térmico disminuye siendo de 0.4074 KJ/mm, con lo que se obtiene un tamaño de grano de 4.8 ASTM. Se observa la disminución en el tamaño de grano así como de la ZAC que es de 2 mm, y se encuentra bien definida, la variación en la dureza es prácticamente nula en comparación con la anterior pieza, aunque se mantiene la tendencia del aumento de dureza debido al incremento gradual en el metal base, en la ZAC y finalmente en el cuerpo de la soldadura.

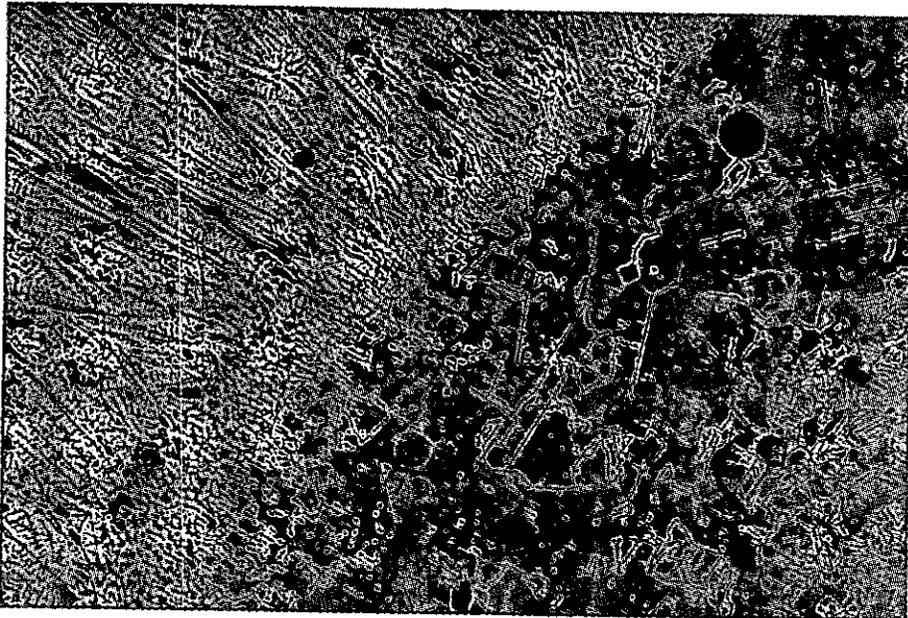
Fig. 13.- Soldadura de acero inoxidable tipo 409L, a diferentes aportes térmicos, nótese la diferencia en el tamaño de grano.



En el caso de los aceros austeníticos, la determinación del espaciamiento interdendrítico no se considera confiable, por lo que no es posible cuantificar la reducción del mismo, aunque se sabe que la reducción de este aumenta las propiedades del material.

En la figura 14. se observa la soldadura de un acero inoxidable tipo 304, donde se observan las tres zonas de interés a) metal base, b) Zona afectada por calor y c) Cuerpo de la soldadura.

FIG 14.- SOLDADURA DE ACERO INOXIDABLE AUSTENITICO.



En la figura 15 se detalla el perfil de dureza obtenido en este material y se detallan cada una de las zonas de interés, la tendencia de la dureza es similar a la de los aceros inoxidables ferríticos es decir se observa un endurecimiento gradual de la zona de soldadura.

CONCLUSIONES

De acuerdo a lo expuesto durante el presente trabajo, es posible crear rangos de operación basados en el aporte térmico lo que permite controlar parámetros de operación del proceso de formado de tubería de acero inoxidable con costura, permitiendo así la repetitividad del proceso, lo que involucra mantener características de calidad homogéneas.

Es factible realizar incrementos sensibles a la productividad del proceso al aumentar la velocidad de formado, esto basado en los rangos de operación modificados. Asimismo es posible variar las características de forma y penetración de la soldadura así como de la zona soldada manteniendo las condiciones de operación establecidas. Al controlar la forma y el ángulo de afilado del electrodo se favorece la disminución del tamaño y forma de los granos presentes en la microestructura de la zona de soldadura y de la extensión de la zona afectada por calor.

Por lo anterior podemos afirmar que:

- ◊ El concepto de aporte térmico permite crear rangos de operación confiables.
- ◊ Se homogenizaron las condiciones de operación del proceso para cada producto, garantizando así la calidad repetitiva de la tubería.
- ◊ El ángulo óptimo de afilado del electrodo es de 42° .
- ◊ Se mejoraron las características metal-mecánicas de la soldadura.

BIBLIOGRAFIA

1. Welding Handbook, Vol. 2 y 3
American Welding Society
AWS Press, 7° Edición.
2. Handbook of Structural Welding
Jhon. F. Lancaster,
Mcgraw Hill, 2° Edición, 1993
3. The Science and Practice of Welding
A.C. Davies.
Cambridge University Press, 8° Edición.
4. ASME Handbook
Mcgraw Hill, 2° Edición, 1965
5. Basic Mig and Tig Welding
Ivan H. Griffin Edward. M Roden Charles W. Briggs
Delmar Publishing. 1984
6. Manual de Soldadura Electrica
Massimo Vladimiro Pierda C.
Limusa, Vol. 1, 1992
7. Soldadura.
James A. Pender
Mcgraw Hill, 3° Edición.
8. Modern Welding Technology
Howard B. Cary.
Prentice Hall, 2° Edición
9. Handbook of Stud Welding.
Philips Welding.
The Netherlands.
10. Welding Technology Principles and Practices.
Craig Stinchcomb
Prentice Hall, Englewood New Jersey, 1989.
11. The Physics of welding
Jhon F. Lancaster
International Institute of Welding, Pergamon Press, Elsford N.Y

12. Metallurgy of Welding
Jhon F. Lancaster
Chapman and Hall, 5ª Edición 1993.
13. Stainless Steel
Robert R. Lula
ASM, Carnes Publication Services 1989.
14. Handbook of Stainless Steel.
Peckner and Berstein.
Mcgraw Hill, 1985.
15. Introduction to the Physical Metallurgy of Welding
Kenneth Esterling
Mcgraw Hill, 1982.
16. Fundamentals of Physical Metallurgy
Jhon D. Verhoeven.
Wiley Inc, New York, 1975.
17. Normas ASTM, 1992
18. Normas AWS, 1993
19. Cracking and Transformation
R. Leinsd
Welding Journal, Vol. 40, Nº 1, 1961
20. The Metallurgical Evolution of Stainless Steel.
F.B Pickering, Amet, Dmet Fim Departament of Metallurgy, Sheffield City
Polytechnic.
International Metals Reviews December, 1976.
21. The Secret of Stainless Steels
David P. Rowlands BCS Eng.
Southern Africa Stainless Steel Development Association.
22. Heat Affected Zone Liquation Cracking in Austenitic and Duplex Stainless
Steel.
J.C Lippold, W.A Baeslack, III and I. Varol
Welding Journal January 1992.
23. Recommended Practices for Gas Tungsten Arc Welding
American Welding Society
AWS. Press.

24. Experiments on production of Tig Arc Welded 18-8 Stainless Steel Pipes
Takashima Jimma and Yukio Kasuga
Bull p.m.c N° 55, 1989.
25. Austenitic Stainless Steel Welding
Welding Journal, Vol. 54N°8, 1975.
26. A Weld Metals
Welding Journal, Vol. 57N°4, 1978.
27. Anodo and Cathode
Geometry and Shielding Gas
Welding Journal, Vol. 59N°12, 1980.
28. Research on production of Tig Arc Welded 18-8 Stainless Steel Pipes
Takashima Jimma and Yukio Kasuga
Research Laboratory of precision of machinery
Tokio Institute of Technology.
29. Especifications for Tungsten Arc Welding Electrodes
AWS A 5.12
AWS Press
30. Simulation of Deep Penetration Welding of Stainless Steel Using
Geometric Constrains Based on Experimental Information.
Journal of Material Engineering and Performace, Vol3, N° 5, 1994
31. The Science of Arc Welding
Welding Journal Research Supplement, Apr. 1960
32. A fundamental Study of the Tungsten Arc.
E. F. Gibbs.
Metal Progress, July 1960.