

6

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO



FACULTAD DE QUIMICA

“EVALUACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE REPARACIÓN DE LOS GENERADORES DE VAPOR EN EL PROCESO DE SOLDADURA DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA VALLE DE MÉXICO”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA

P R E S E N T A:

VERÓNICA MARTINEZ FLORES

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



México,D.F.

EXAMENES PROFESIONALES FACULTAD DE QUIMICA

2002



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	M.C. Campillo Illanes Bernardo Fabián.
Vocal	M.C. Robert Núñez Teresita.
Secretario	I.Q.M. Aramburo Pérez Gerardo.
1er. Suplente	M.C. Sánchez Santiago Arturo Alejandro.
2do. Suplente	M.C. García Galán Sergio.

Sitio donde se desarrollo el tema:

Central Termoeléctrica Valle de México.
Departamento de Metalurgia, Facultad de Química, UNAM.

Asesor del Tema:



I.Q.M. Gerardo Aramburo Pérez.

Supervisor Técnico:



M.C. Sergio García Galán.

Sustentante:



Verónica Martínez Flores.

CONTENIDO

SECCIÓN		PÁGINA
	INTRODUCCIÓN	1
I	CONCEPTOS TEÓRICOS	4
1.1	Proceso de Soldadura GTAW	4
1.2	Características del Arco Eléctrico con Electrodo de Tungsteno	5
1.2.1	Arco Eléctrico	5
1.2.1	Fuentes de Alimentación	5
1.2.3	Electrodo de Tungsteno	8
1.2.4	Gases de Protección para GTAW	9
1.2.5	Varillas de Aportación	10
1.2.6	Ventajas y Desventajas	10
1.3	Ciclos Térmicos durante la Operación de Soldadura	10
1.3.1	Calor y Tiempo en la Soldadura	12
1.3.2	Velocidad de Calentamiento	13
1.3.3	Temperatura Máxima	13
1.3.4	Distribución de Temperaturas	14
1.4	Características Metalúrgicas	15
1.4.1	Zonas de Unión Soldada	15
1.4.2	Diagramas	16
II	DESARROLLO EXPERIMENTAL	22
2.1	Materiales bajo Estudio	22
2.1.1	Uniones Soldadas bajo Estudio	22
2.1.2	Varillas bajo Estudio	23
2.2	Preparación de muestras	24
2.2.1	Corte y Biselado	24

2.2.2	Condiciones en la Realización de la Soldadura	25
2.2.3	Soldadores Calificados y Procedimiento por ASME	25
2.2.4	Estudio Metalográfico	26
2.2.5	Mapeo de Durezas	26
2.3	Medición de Delta Ferrita	27
2.3.1	Delta Ferrita Teórica	28
2.3.2	Delta Ferrita Experimental	28
III	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
3.1	Macrofotografías	29
3.2	Gráficas de Durezas	33
3.3	Microestructura	37
IV	CONCLUSIONES	51
V	BIBLIOGRAFÍA	52

INTRODUCCIÓN

La CFE a través de la Central Termoeléctrica Valle de México aporta el 2.41 % de la energía eléctrica a nivel nacional y es una de las principales fuentes de energía del País. Forma parte del Sistema Interconectado Nacional integrándose a este a través de las líneas de transmisión de 85 000 y 230 000 Voltios.

Una de las actividades que se realizan en el mantenimiento del Generador de Vapor es la técnica de soldadura, en cualquiera de sus elementos, y es fundamental para el desarrollo y productividad de la planta.

Actualmente es uno de los principales medios de reparación de piezas metálicas ya que es un proceso eficaz, que reúne así factores de calidad, seguridad y economía para la unión de metales.

Con el fin de realizar un mantenimiento que asegure que el metal posee las características que se le demandan, el proceso de soldadura de arco eléctrico con electrodo de tungsteno y gas inerte (GTAW por sus siglas en inglés), que se aplica en Generadores de Vapor, es el más eficaz ya que proporciona a las uniones soldadas mayor confiabilidad. Por lo anterior esta Institución debe contar con los procedimientos de inspección, materia prima, aprobación e inspectores certificados de acuerdo al Código ASME.

Junto con la necesidad de deformar, cortar y eliminar material para llegar a la forma final del producto, a menudo se requiere unir partes metálicas, de tal forma que la pieza así formada tenga las propiedades físicas, mecánicas, fisicoquímicas y metalúrgicas requeridas.

Lo que es mas, en ocasiones es necesario unir dos piezas de diferentes metales, reparar piezas que se han fracturado y que no es económicamente factible su reposición por piezas nuevas o recubrir piezas de un material determinado con otro tipo de metal para protegerlo contra ataques corrosivos y abrasivos. Todo esto confiere a la tecnología de la unión de las piezas metálicas por medio del proceso de soldadura, un nivel de importancia cuanto menos tan grande como a los otros procesos utilizados en la industria Metal-Mecánica.

La soldadura se ha dividido en tres ramas en función de la temperatura siendo la soldadura por fusión la mas importante a nivel industrial; en este proceso se busca que el metal de aporte y una parte de metal de base se funde y, como resultado, formen una sola pieza homogénea de metal con sus propiedades metalúrgicas y mecánicas correspondientes. El arco eléctrico cumple con los requisitos en eficiencia térmica puntual manejando temperaturas elevadas.

En la unión soldada por arco eléctrico la zona afectada térmicamente presenta propiedades mecánicas distintas a la de metal de aporte y metal de base.

Cuando se sueldan aceros inoxidables, superaleaciones de base Ni, Fe y Co, Ti y otros metales especiales, en general se utilizan metales de aporte con la misma composición química que el metal de base; en el caso de los aceros al carbón, aceros templables, aceros de mediana y alta aleación e hierros colados esto no es posible; además es frecuente que por un razonamiento un tanto distorsionado se utilicen composiciones diferentes en los metales de aporte.

En el presente trabajo tiene por objetivo determinar la compatibilidad metalúrgica de algunos metales de aporte con los metales base utilizados en la Central Termoeléctrica, considerando que todas las uniones soldadas se encuentran bajo los requerimientos del Código ASME, Secc. IX Ed.1998

Para ello se estudiaron las uniones soldadas por microscopía óptica y electrónica de barrido y mapeo de dureza en las zonas afectadas térmicamente por el proceso de soldadura GTAW. Se utilizó este proceso por el hecho de que en él la protección del metal se realiza con gas inerte y en esta forma se evita la complicación extra que pueda aportar la presencia de una escoria.

I CONCEPTOS TEORICOS

1.1 Proceso de Soldadura GTAW

El proceso de soldadura de arco eléctrico con electrodo de tungsteno y gas inerte (GTAW por sus siglas en ingles) se produce entre el electrodo de tungsteno (no consumible) y la pieza de trabajo. La protección se obtiene por medio de una gas o mezcla de gases. La varilla de aportación puede o no ser usada. Este proceso también es llamado Soldadura "TIG" la cual hace referencia a "Tungsten Inert Gas".

Los principales elementos que forman parte del proceso de soldadura GTAW son:

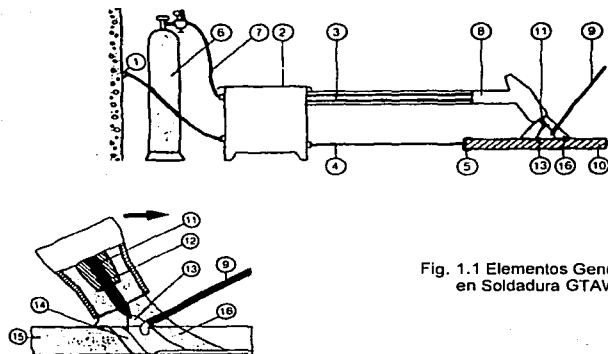


Fig. 1.1 Elementos Generales en Soldadura GTAW

- 1) Conexión a la Red Eléctrica.
- 2) Fuente de corriente.
- 3) Aporte de corriente al electrodo.
- 4) Aporte de corriente a la pieza.
- 5) Pinza de masa.
- 6) Tanque de gas protector con reductor de presión y flujómetro de gas.
- 7) Manguera del gas de protección.
- 8) Antorcha.
- 9) Varilla de Aporte.

-
-
- | | |
|----------------------------|-----------------------------------|
| 10) Pieza a Soldar. | 14) Metal fundido de la soldadura |
| 11) Electrodo de Tungsteno | 15) Metal sólido de la soldadura |
| 12) Mordaza de Contacto | 16) Gas Protector |
| 13) Arco | |

1.2 Características del Arco Eléctrico con Electrodo de Tungsteno

1.2.1 Arco Eléctrico

El arco eléctrico está formado por una nube en continuo movimiento de átomos ionizados y electrones, este estado de la materia se llama plasma, el cual es estable a altas temperaturas. El Tungsteno hace referencia al material que constituye el electrodo por tener un elevado punto de fusión, no consumible, situado dentro de la boquilla y cuya finalidad es la de establecer el arco eléctrico creando una elevada temperatura capaz de producir la fusión de los metales. Para preservar el baño de fusión con un arco limpio se emplea una atmósfera de gas inerte que generalmente es Argón, Helio o mezcla de ambos gases.

Las variables que se consideran al establecer el arco eléctrico son:

- Potencial de ionización (Estabilidad del Plasma)
- Voltaje (Diferencia de Potencial, energía cinética de los electrones)
- Amperaje (Cantidad de electrones que pasan por unidad de tiempo, cantidad de calor aportada)

1.2.2 Fuentes de Alimentación

Para la correcta unión de dos piezas mediante el proceso de soldadura GTAW se debe tener especial atención en la polarización del electrodo y la pieza, se determina en función del espesor de las piezas, el material y el tipo de corriente empleada; las alternativas son corriente continua y corriente alterna.

1) Corriente continua.

En el empleo de este tipo de corriente existen dos variantes, polarizar tanto directa como inversamente según el grado de penetración que se desea obtener. En el caso de realizar una polarización directa se conecta el electrodo y la pieza a soldar según se indica en la figura 1.2

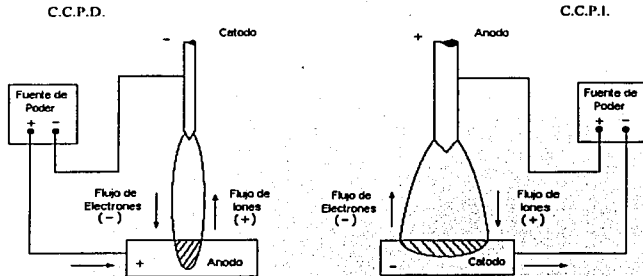


Fig 1.2 Efecto de la polaridad en el Proceso GTAW

El electrodo está conectando al borde negativo (-) del equipo y la pieza a soldar va conectada al borde positivo (+); con ello se obtiene una circulación electrónica desde el electrodo hacia la pieza, lo cual dará lugar a una mayor penetración y a un baño de fusión estrecho; se consigue concentrar la energía calorífica del arco sobre una zona reducida de la pieza y es por ésta razón que el electrodo sufre menos desgaste, soportando una intensidad mayor que si estuviera conectado al polo positivo(+).

Si por el contrario, se realiza una polarización inversa, el borde positivo (+) queda ahora conectado al electrodo y el borde negativo (-) a la pieza a soldar, ello dará lugar a una circulación de electrones desde la pieza al electrodo consiguiéndose así una menor penetración de la energía calorífica del arco y un baño de fusión más ancho; el electrodo es el que soporta en gran medida la elevada temperatura.

En la polarización inversa el electrodo sufre un mayor desgaste por lo que se debe de emplear electrodos con diámetros mayores y con la punta redondeada para que éste no se funda y contamine la soldadura.

2) Corriente alterna

Con este tipo de corriente se pretende sumar las características que proporciona la polaridad directa y la inversa, se emplea principalmente en la soldadura del aluminio y sus aleaciones. En la aplicación de la corriente alterna al electrodo, en el primer semiciclo positivo (+) se actúa como si se estuviese polarizando inversamente; al llegar la siguiente mitad de onda (el semiciclo negativo (-)) el equipo actúa como si estuviese polarizando directamente; estas ventajas son de gran utilidad para realizar soldaduras en piezas cuya superficie posee una película de óxido considerable, humedad, costras, etc.

Cuando se aplica la corriente alterna, en el caso de actuar el semiciclo negativo (-) sobre el electrodo, se proporciona temperatura suficiente sobre la película de óxido como para vencerla; una vez rota dicha película el electrodo llega al semiciclo positivo (+) produciendo una menor penetración en el material, protegiéndolo así de una posible perforación. Si en este mismo caso solo se hubiera operado con polaridad directa, una vez rota la película de óxido, la energía calorífica proyectada sobre la pieza a soldar sería tan intensa que la fundiría y por el contrario si solo se opera con polaridad inversa no se podría realizar la soldadura, ya que la película de óxido impide la creación de un baño de fusión.

Con el objeto de establecer una mayor estabilidad del arco eléctrico se emplean bajas intensidades, altos voltajes y sobre todo altas frecuencias. Para su uso es necesario el empleo de un generador de alta frecuencia que facilita el cebado del arco y su posterior estabilización.

1.2.3 Electrodo de Tungsteno

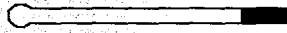
La característica principal del electrodo es que tiene un elevado punto de fusión, por lo cual no se funde y su misión es la de mantener el arco eléctrico sin aportar material. En base a la AWS, la clasificación de los diferentes tipos de electrodos usados en el proceso de soldadura GTAW se muestra en la tabla 1.1

Clasificación AWS	Color	Elemento de Aleación	Óxido de Aleación	Oxido de Aleación (% wt)
EWP	Verde
EWCe-2	Anaranjado	Cerio	CeO ₂	2
EWLa-1	Negro	Lantano	La ₂ O ₃	1
EWTh-1	Amarillo	Torio	ThO ₂	1
EWTh-2	Rojo	Torio	ThO ₂	2
EWZr-1	Cafe	Zirconio	ZrO ₂	0.25

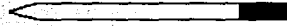
Tabla 1.1 Clasificación de Electrodo de Tungsteno para el Proceso GTAW

El electrodo mas común es el EWTh-2 porque cuenta con excelentes características de operación y presenta buena estabilidad

La cantidad de emisión de electrones requeridos está en función del tipo de corriente que se va a ocupar; para corriente alterna y corriente continua polaridad inversa, la punta del electrodo es en forma de bola, y en el caso de corriente continua polaridad directa la punta del electrodo es en forma de punta, lo anterior se esquematiza en la figura 1.3



(a) Electrodo en forma de bola



(b) Electrodo en forma de Punta

Fig. 1.3 Características de las puntas de los electrodo.

1.2.4 Gases de Protección para GTAW

El propósito del gas inerte es mantener aislado el arco y el metal de los gases del aire. Los dos gases de uso más extenso para el proceso de soldadura GTAW son el Argón y el Helio; se recomienda el Argón para soldadura GTAW manual porque es mucho más denso que el Helio y se necesitan 2.5 veces más de Helio para producir los mismos efectos que el Argón. Sin embargo se prefiere el Helio para soldadura GTAW automática y semiautomática porque se produce un arco de mayor penetración; es probable que se produzca deformación del metal base si se utilizan secciones delgadas.

Las mezclas de Argón y Helio presentan excelentes resultados en soldadura de aluminio y sus aleaciones, permitiendo mayor velocidad y más penetración.

Las mezclas de Argón e Hidrógeno que contienen de un 2 a un 5 % de H_2 se suelen usar para el acero inoxidable. Esta mezcla permite usar mayor tensión del arco con lo que se aumenta la penetración, aunque tienen la limitación de que no se deben usar para los aceros al carbón porque pueden producirse fisuras en la ZAT (Zona Afectada Térmicamente) ni en las aleaciones de aluminio y cobre debido a la porosidad del metal de la soldadura.

1.2.5 Varillas de Aportación

Con el fin de producir soldaduras con las mismas cualidades metalúrgicas del metal base a soldar, las varillas de aportación se fabrican con variedad y tipos como los metales existentes.

La elección de la varilla está en función del metal o metales base y de las condiciones operativas, sobre todo en caso de uniones con metales diferentes en las que no existe compatibilidad metalúrgica y el tipo de varilla puede diferir notablemente.

1.2.6 Ventajas y Desventajas

En el proceso de soldadura GTAW se destacan las siguientes ventajas respecto a otros procesos de soldadura.

- Este proceso no siempre requiere de metal de aportación.
- Debido a que se realiza bajo una atmósfera inerte se consiguen soldaduras más resistentes a la corrosión, limpias de contaminaciones como inclusiones de escorias.
- Es posible realizar soldaduras en todas las posiciones
- Se puede aplicar para una amplia gama de metales.
- Se consiguen cordones de gran calidad, mas dúctiles y elevado rendimiento.

Las desventajas en el proceso de soldadura GTAW son las siguientes:

- Máxima Lentitud (1" / min)
- Se requiere una alta habilidad por parte de los soldadores.

1.3 Ciclos Térmicos durante la Operación de Soldadura

En los procesos que se utilizan actualmente para varios metales se aplica energía a la pieza de trabajo. De hecho la aplicación tiene la suficiente intensidad como para fundir una sección de metal en el área de unión.

El mejor recurso para tratar los efectos indeseables por el calentamiento es conocer la temperatura que alcanza cada zona de la unión soldada, y su subsecuente trayectoria de enfriamiento. Por lo tanto el control de los ciclos térmicos minimizan el efecto del calentamiento.

En soldadura se presentan altas temperaturas y enfriamientos muy rápidos, por ésta razón que se trata la combinación temperatura y tiempo.

Los cambios de temperatura durante la soldadura son mas grandes y repentinos que en ningún otro proceso metalúrgico.

En el desarrollo del proceso térmico de la soldadura se tiene: a) Un control en los cambios de temperatura de la soldadura, y b) Una modificación del comportamiento metalúrgico del metal base durante los ciclos térmicos.

Cuando se analizan los efectos indeseables del calor en la soldadura, el área de interés principal no necesariamente es la zona de fusión o el metal soldado. El calor afecta el metal base adyacente a la soldadura y puede ser propenso a desarrollar condiciones desfavorables, por ello cada punto, zona, área de las inmediaciones de la soldadura es de suma importancia, y los puntos bajo estudio son:

- Velocidad de Calentamiento
- Temperatura Máxima
- Duración de la Temperatura
- Velocidad de enfriamiento

Cuando éstos factores se conocen muchos de los efectos de la soldadura sobre el metal base se pueden predecir y explicar.

La fusión local o la cantidad de penetración en la unión soldada es controlada por el calor suministrado. La penetración en el metal base, puede tener una profundidad en donde influye la cantidad de elementos de aleación por la mezcla que ocurre entre el metal base y el metal de la varilla. La temperatura máxima que alcanza el área de la soldadura se determina por la distancia del crecimiento de grano así como la magnitud de abatimiento de la dureza las cuales se presentan en la zona afectada térmicamente.

La expansión y contracción del metal base en una sección depende de la temperatura alcanzada. Tal vez el aspecto más importante de los cambios de temperatura en soldaduras de aceros al carbón y aceros aleados es el grado de endurecimiento que puede ocurrir en las zonas afectadas térmicamente.

1.3.1 Calor y Tiempo en la Soldadura

Existe un flujo de calor entre un área y otra siempre y cuando exista una diferencia de temperaturas.

La velocidad del flujo de calor esta en función del gradiente de temperatura así como de las propiedades del metal a través del cual se tiene el flujo. (La diferencia de temperaturas por unidad de distancia se llama gradiente de temperatura). En soldadura se debe prevenir cada paso del gradiente de temperatura no solo entre la fuente de calor y la pieza de trabajo, sino también en el interior de las piezas a unir.

La transferencia de calor de un lugar a otro está dado por tres medios: conducción, convección y radiación. En la soldadura la transferencia de calor generalmente ocurre por conducción. El transporte de calor por convección y radiación son despreciables.

1.3.2 Velocidad de Calentamiento

La velocidad de calentamiento en la soldadura depende de la intensidad de la fuente de calor y la eficiencia de transferencia de calor. La fuente debe contar con suficiente poder para suministrar el flujo de calor a la pieza de trabajo sin que la máquina sufra decrementos de temperatura.

Es importante observar que la temperatura de operación de la fuente de calor en cada proceso se establece por el gradiente de temperaturas entre la fuente de calor y la pieza de trabajo. A altas temperaturas aumenta el gradiente de temperatura y por lo tanto aumenta la velocidad de calentamiento.

Los procesos de soldadura con arco (usualmente con electrodo) comparados con soldadura de gas, presentan existen dos diferencias importantes en la velocidad de calentamiento. Primero la temperatura del arco es considerablemente mas alta que la de la flama oxiacetilénica. Una temperatura cercana a 10 000°C es un valor ordinario en procesos de soldadura de arco. Segundo, el arco está en contacto con el metal base y no requiere manipulación del operador para mantener el arco en una posición adecuada tal para la transferencia de calor. Hay que tomar en cuenta que no toda la generación de calor que se produce es absorbida por la pieza de trabajo. Cierta cantidad de calor se pierde en el aire, esto depende del comportamiento del operador. Cerca de un cuarto del calor que se genera en el arco se pierde en el aire(incluyendo la vaporización del acero) y el electrodo. Las tres cuartas partes restantes provocan el aumento de temperatura en las partes de la soldadura.

1.3.3 Temperatura Máxima

La temperatura máxima que se tiene en la pieza de trabajo puede ser determinada por la velocidad de calor suministrada y la velocidad con la que se pierde. A la misma velocidad que el calor es suministrado y perdido, es posible alcanzar una temperatura máxima.

En el momento justo en que el calor suministrado es igual al calor perdido, se obtiene un máximo de temperatura. Esto es cierto incluso cuando la fuente de calor se retira rápidamente y la igualdad solo es por un instante.

En la práctica se considera el requerimiento de una mayor cantidad de calor para fundir el metal y no solo con el cálculo de la cantidad de masa. La razón se debe al aumento de temperaturas en un lugar específico de la placa, la temperatura asciende en todas las regiones de la vecindad de la soldadura en base a las leyes físicas y de transferencia de calor.

Por lo tanto el calor de la soldadura es más que el necesario, no solo el requerido para fundir el metal de aporte, además se presenta un aumento de temperatura en la vecindad de la soldadura requerido por las leyes de transferencia de calor. Con lo anterior se establece que a una velocidad menor de suministro de calor en procesos de soldadura, se requiera una mayor cantidad de calor además de la requerida para fundir un área local del metal base.

1.3.4 Distribución de Temperaturas

El suministro de energía como fuente de calor no necesariamente la recibe la pieza de trabajo.(Fig 1.4) Por lo tanto se tiene que tener cuidado en distinguir entre el calor suministrado por la fuente de calor y el calor recibido por la pieza de trabajo.

La proporción de la energía o del calor en condiciones de soldadura se encuentra en el intervalo de 20% a 75%, por lo que se puede determinar los efectos del calor suministrado en la pieza de trabajo y la temperatura máxima alcanzada en áreas específicas de la pieza de trabajo.(Fig.1.5)

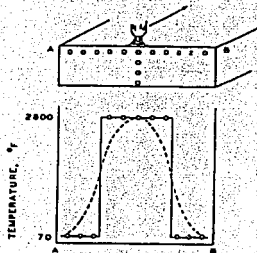
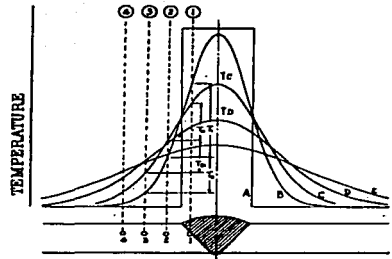


Fig. 1.5 Temperatura en cada punto de la vecindad de la soldadura a cinco tiempos diferentes (A-E).

Fig. 1.4 Distribución de Temperaturas en la pieza de trabajo durante la soldadura.



1.4 Características Metalúrgicas.

1.4.1 Zonas de la Unión Soldada

La extracción de calor en soldadura se presenta por conducción hacia el metal base y es por ello que se presenta una zona de afectación térmica, alterando significativamente la estructura original del metal base en una zona adjunta a la soldadura. En la figura 1.6 se definen las zonas afectadas térmicamente.



Fig. 1.6 Diferentes zonas de la unión soldada

- 1) Zona de fusión
- 2) Zona de Fusión Parcial
- 3) Zona de Transformación Total
- 4) Zona de Transformación Intercritica
- 5) Zona de Revenido
- 6) Metal Base
- 7) Metal de Aporte

La representación de la microestructura de la unión soldada se muestra en la figura 1.7.

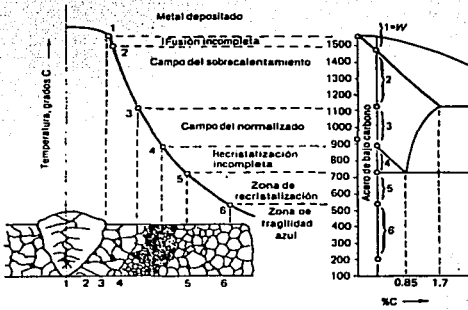


Fig.1.7 Solidificación Progresiva de la unión soldada.

1.4.2 Diagramas.

El acero AISI-347 (Acero Inoxidable Austenítico) no es transformable por ésta razón en el análisis metalúrgico solo se hace uso del diagrama pseudobinario y el diagrama de Schaeffler para la determinación de la ferrita delta que implica el grado de fragilización por el cambio de red cristalina, siendo una ferrita alotriomorfa.

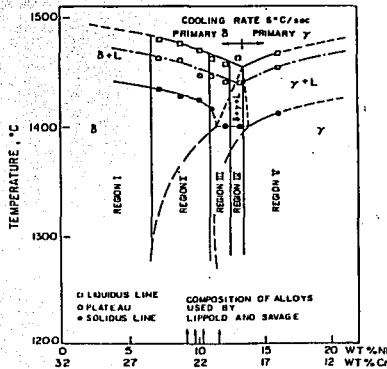


Fig.1.8 Diagrama Pseudobinario a 68%Fe.¹

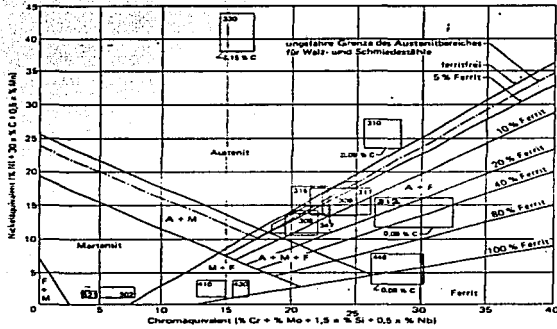


Fig. 1.9 Diagrama de Schaeffler.²

El acero AISI-1026 es un acero al carbón. El comportamiento metalúrgico se puede predecir por el Diagrama de Enfriamiento Continuo para Soldadura en el cual se determina la historia térmica en función del tiempo.

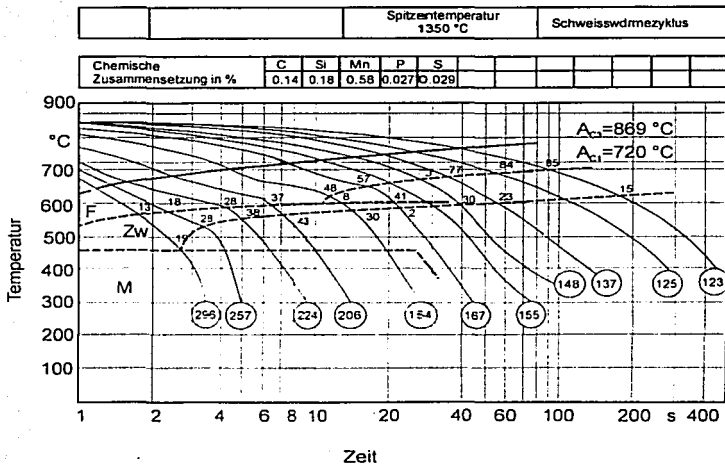


Fig. 1.10 Diagrama de Enfriamiento Continuo para Soldadura (AISI-1026).³

En el análisis metalúrgico del acero ASTM-T-22 se hace uso del Diagrama de Enfriamiento Continuo para Soldadura en el cual se determina la historia térmica en función del tiempo.

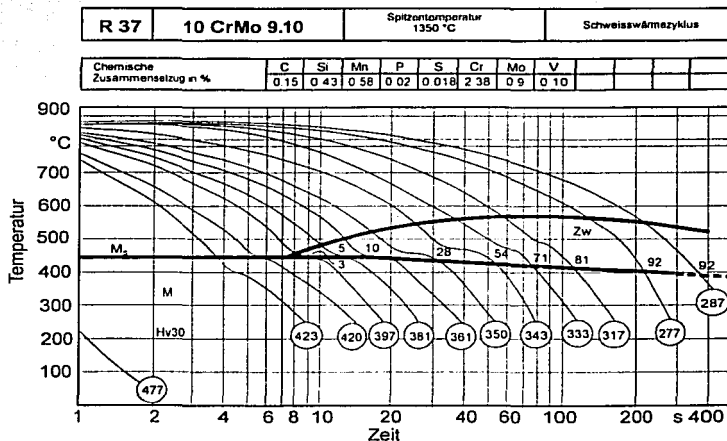


Fig. 1.11 Diagrama de Enfriamiento Continuo para Soldadura (ASTM-T-22).⁴

En el caso de los aceros AISI-410 y AWS-ER-502 no se han desarrollado diagramas de enfriamiento continuo para soldadura, donde su temperatura de austenitización es de 1350°C, por lo que es necesario realizar una extrapolación a partir de diagramas de enfriamiento continuo (temperatura de austenitización 980°C) y datos de un acero C-45 el cual cuenta con ambos diagramas.

¹ R.A.Lula, "Stainless Steel", ASM, pag 73.

² Seyffarth Von P., "Schweiß ZTU-Schaubilder", 1982, pag 14

³ Seyffarth Von P., "Schweiß ZTU-Schaubilder", 1982, pag 28

⁴ Seyffarth Von P., "Schweiß ZTU-Schaubilder", 1982, pag 96.

La importancia de contar con diagramas de enfriamiento continuo para soldadura radica en la temperatura de austenitización a la cual comienza la historia térmica y repercute en el tiempo crítico de temple y con ello la formación de martensita.

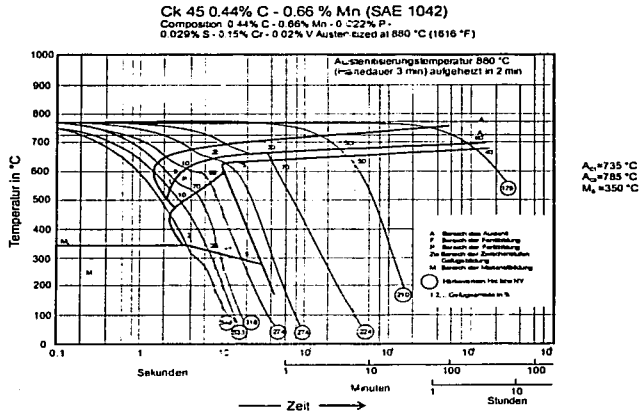


Fig.1.12 Diagrama de Enfriamiento Continuo para Soldadura (Acero C-45).⁵

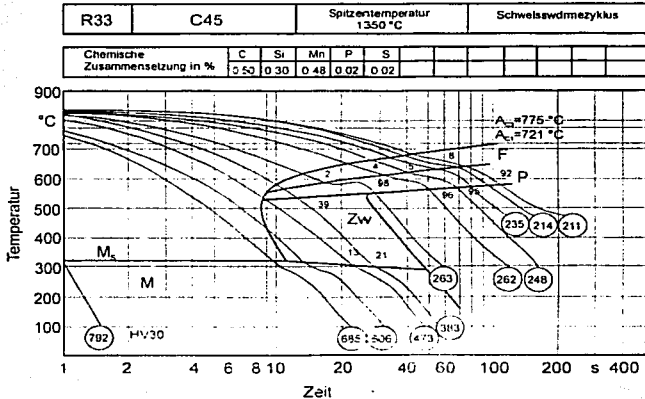


Fig. 1.13 Diagrama de Enfriamiento Continuo (Acero C-45).⁶

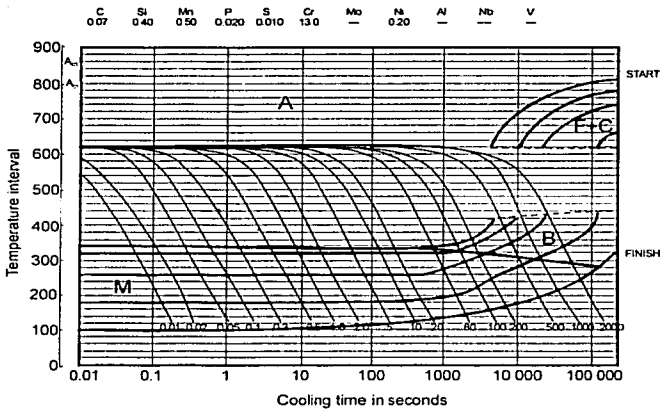


Fig. 1.14 Diagrama de Enfriamiento Continuo (AISI-410).⁷

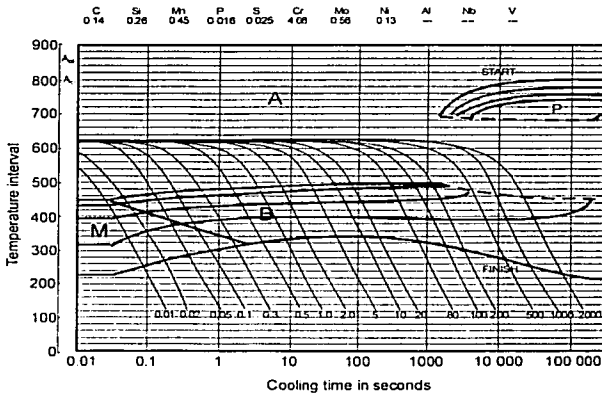


Fig. 1.15 Diagrama de Enfriamiento Continuo (AISI-502).⁸

⁵ Vander Voort G "Atlas of Time-Temperature Diagrams for Irons and Steels".ASM, pag. 118

⁶ Seyfarth Von P., "Schweiz ZTU-Schaubilder", 1982, pag 88.

^{7,8} M. Atkins, "Atlas of Continuous Cooling Transformation Diagrams for Engineering Steels", ASM, pages 168,201.

Determinación del tiempo Crítico de Temple a partir de extrapolación de datos proporcionados por Diagramas de enfriamiento del acero C-45.

Tipo de Acero	t_{CT} (T_{γ} 980°C)	t_{CT} (T_{γ} 1350°C)
C-45	3 seg.	8.5 seg.
AISI-410	1000 seg.	2833 seg.
AISI-502	0.05 seg.	0.14 seg.

Tabla 1.2 Datos de tiempos críticos.

T_{γ} = Temperatura de Austenitización.

t_{CT} = Tiempo Crítico de Temple.

En el caso del acero AISI-410 se hace uso del Diagrama de Fases Fe-Cr para justificar la existencia de delta ferrita.

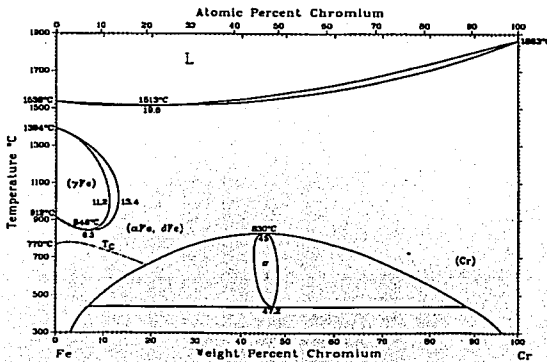


Fig. 1.25 Diagrama de Fases Fe-Cr.⁹

⁹ ASM Handbook, "Alloy Phase Diagrams", Vol 3, pag 152.

I I DESARROLLO EXPERIMENTAL

En el análisis metalúrgico de los diferentes metales de aporte y metales base se realizaron los siguientes pasos:

- Se realizó un estudio de aquellas uniones en tuberías a alta presión con una frecuencia mayor de falla, en base a los Procedimientos de Soldadura de la Central Termoeléctrica.
- Corte y preparación en las tuberías representativas para realizar la soldadura con soldadores calificados de acuerdo al Código ASME, Secc IX.
- Corte seccionado y preparación metalográfica para la realización del análisis metalúrgico.

2.1 Materiales bajo Estudio

2.1.1 Uniones Soldadas bajo Estudio

1) AISI-347 / AWS ER-347 / AISI-347

M.B. / M.A. / M.B.



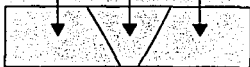
2) AISI-347 / AWS ER-347 / AISI-410

M.B. / M.A. / M.B.



3) AISI-1026 / AWS ER70-S-2 / AISI-1026

M.B. / M.A. / M.B.



4) ASTM-T22 / AWS ER-502 / ASTM-T22

M.B. / M.A. / M.B.



M.B.= Metal de Base.

M.A.= Metal de Aporte.

Elemento	Especificación			
	%wt max	AISI 347	AISI 410	AISI 1026
Carbon	0.080	0.15	0.22 – 0.28	0.08 – 0.15
Manganeso	2.00	1.00	0.58 – 0.90	0.40 – 0.70
Fosforo	0.045	0.04	0.040	0.035
Azufre	0.030	0.030	0.050	0.035
Silicio	1.0	1.00	0.18	0.50
Cromo	17	11.5-13.5	---	2.0 – 2.5
Niquel	9-13	---	---	---
Molibdeno	---	---	---	0.9 – 1.2
Niobio + Tantalio	(a)	---	---	---
Vanadio	---	---	---	0.10

(a) Diez veces el contenido mínimo de Carbón

Tabla 2.1. Composición Química de Metales bajo Estudio.¹⁰

2.1.2 Varillas Bajo Estudio

Los tipos de varilla aplicados a las diferentes uniones soldadas son: AWS-ER-347, AWS-ER-502 y AWS-ER-70S-2.

Elemento	AWS	AWS	AWS-
%wt	ER-347	ER-502	ER-70S-2 (*)
Carbón	0.08	0.10	0.06
Cromo	19.0 – 21.5	4.5 – 6.0	---
Niquel	9.0 – 11.0	0.6	---
Manganeso	1.0 – 2.5	0.6	0.90-1.40
Silicio	0.25 – 0.60	0.25 – 0.60	0.40-0.70
Molibdeno	---	0.45 – 0.65	---
Niobio +Tantalio	10°C min – 1.0 max	..	---
Fósforo	0.03	0.03	0.025
Azufre	0.03	0.03	0.035

Tabla 2.2 Composición Química de las Varillas.¹¹

(*) El electrodo AWS ER-70S-2, también contiene: Titanio=0.05-0.15, Zirconio=0.02-0.12 y Aluminio=0.05-0.15.

2.2 Preparación de Muestras

2.2.1 Corte y Biselado

A partir de un estudio en la Central Termoeléctrica se determinó los cuatro principales tipos de uniones soldadas que presentan fallas. De los diferentes elementos del generador de vapor se extrajeron los tubos correspondientes, las dimensiones de partida se muestran en la tabla 2.3. Posteriormente se cortaron con una pulidora de disco y se realizó un bisel a 45° con una fresadora de biselado; lo anterior con el apoyo de Soldadores Calificados y personal del Departamento Mecánico de la Central Termoeléctrica.

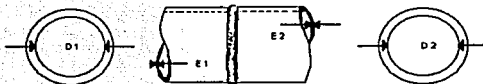


Fig.2.1 Dimensiones de las tuberías.

Tipo de Unión	Medida			
	E 1 (mm)	D 1 (cm)	E 2 (mm)	D 2 (cm)
AISI-347 / AWS ER-347 / AISI-347	7	3.9	7	3.9
AISI-347 / AWS ER-347 / AISI-410	7.5	3.9	10	3.5
AISI-1026 / AWS ER70-S-2 / AISI-1026	5	5.25	5	5.25
ASTM-T22 / AWS ER-502 / ASTM-T22	3.5	5.3	5	5

Tabla 2.3 : Dimensiones de las Tuberías.

¹⁰ ASM Handbook, Vol 1 pag 65.

¹¹ Código ASME Secc.II, Parte A pag 125.

2.2.2 Condiciones en la Realización de la Soldadura

La realización del proceso de soldadura en los diferentes uniones, se determinó en base al Programa de Mantenimiento de la Central Termoeléctrica; esto es, las dimensión y el tipo de varilla y el amperaje requerido. (Tabla 2.4). La posición a la cual se realizó la soldadura fue de 45°.

Tipo de Unión	Amperaje (A)	Diámetro de Varilla (In)	Tipo de Varilla AWS
AISI-347 / AWS ER-347 / AISI-347	110	3/32	ER-347
AISI-347 / AWS ER-347 / AISI-410	110	3/32	ER-347
AISI-1026 / AWS ER70-S-2 / AISI-1026	100	3/32	ER-70S-2
ASTM-T22 / AWS ER-502 / ASTM-T22	120	3/32	ER-502

Tabla 2.4 Condiciones para el Proceso de soldadura.

2.2.3 Soldadores Calificados y Procedimiento por ASME

Para la realización del proceso GTAW en líneas de vapor a alta presión se requiere una alta calidad, es por ésta razón la necesidad de soldadores certificados, que cumplan con los requisitos aplicables de estándares particulares y del Código ASME Secc. IX "Welding and Brazing Qualifications" Edition 1998.

En base al Artículo II de la Secc. IX del Código ASME (Edition 1998) se aplica:

- QW-200. La Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS por sus siglas en ingles) es un escrito en el cual se proporcionan las condiciones operatorias requeridas por Código.
- QW-304 Para la calificación de un soldador sus soldaduras deben pasar por los requerimientos de examinación mecánica y visual de acuerdo a QW-302.1 y QW-302.4.

2.2.4 Estudio Metalográfico

En la determinación de la microestructura de las tuberías de recepción, se realizaron cortes de 1.5cm por 1cm y el espesor correspondiente a cada tubería (Fig 2.2). Para la realización del análisis microestructural de las diferentes uniones soldadas se utilizó un microscopio metalográfico Olympus 58 y un microscopio electrónico de barrido Joel Modelo 15984.

En la preparación metalográfica se utilizó Trióxido de Cromo al 5% (Ataque electroquímico) y Nital 5.

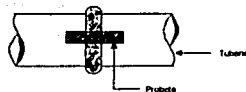


Fig.2.2 Figura de la tubería y obtención de la probeta.

2.2.5 Mapeo de Durezas

En la realización del mapeo de durezas en las diferentes uniones soldadas se utilizó el Microdurometro FG-5000; se obtuvieron datos de dureza MicroVickers en base a la Norma ASTM

El mapeo de durezas se realizó en forma horizontal con una distancia de un milímetro por cada indentación y a un tercio de la altura de la soldadura (Fig. 2.3), se abarcan los dos metales base, la zona afectada térmicamente y el metal de aporte, obteniendo así la gráfica correspondiente al tipo de unión soldada.

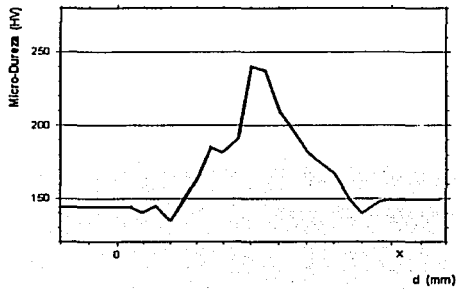
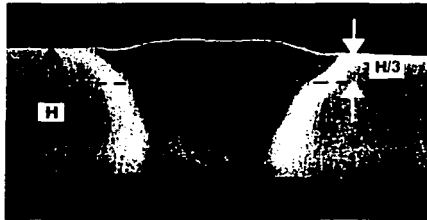


Fig 2.3 Esquema General del Mapeo de Durezas

2.3 Medición de Delta Ferrita.

Para la determinación teórica de la cantidad de delta ferrita se hizo uso del Diagrama de Schaeffler que esta en función del Cromo y Níquel equivalente; está estructurado en base a la composición de cada acero.

Así mismo se realizaron mediciones experimentales con el magneto:02, en el Instituto de Investigaciones Nucleares (ININ), en base al Procedimiento P.SC (LC)-12 "Determinación de la Cantidad de Delta Ferrita por medio de un Magne-Gage". Rev.0: Junio 1998.

2.3.1 Delta Ferrita Teórica.

Fórmulas que se usan para determinar la delta ferrita, según el Diagrama de Schaeffler.

Cromo Equivalente: $\%Cr + (1.4 * \%Mo) + (1.5 * \%Si) + (0.5 * \%Nb) + (2 * \%Ti)$

Níquel Equivalente: $\%Ni + (30 * \%C) + (0.5 * \%Mn) + (30 * \%N)$

- Unión Soldada: AISI-347 / AWS ER-347 / AISI-347.

Cromo Equivalente: 17.9-20.4

Níquel Equivalente: 12.4-15.3

Delta Ferrita: 1-2%

- Unión Soldada: AISI-347 / AWS ER-347 / AISI-410

Cromo Equivalente: 15.45-18.3

Níquel Equivalente: 8.7-9.5

Delta Ferrita: 3-5%

2.3.1.1 Delta Ferrita Experimental.

- Unión Soldada: AISI-347 / AWS ER-347 / AISI-347

Delta Ferrita: $0,1,6,3,4,4,2,2,0,3,4 = 2.92\%$

- Unión Soldada: AISI-347 / AWS ER-347 / AISI-410

Delta Ferrita: $0,1,3,5,5,2,4,6,5,4 = 3.94\%$

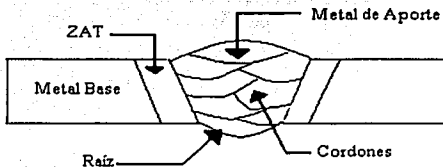
III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Macrofotografías

En la unión soldada AISI-347 / AWS ER-347 / AISI-347 (Fig.3.1) se observan las diferentes zonas de la soldadura (metal base, metal de aporte, la zona afectada térmicamente, la raíz y una cantidad de cordones).

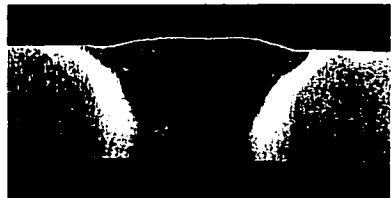
Dado que se trata del mismo material base en ambos lados de la unión soldada, la transferencia de calor y por lo tanto la zona afectada térmicamente, en distancia, es la misma en ambos lados de la soldadura. El material de aporte es AWS ER-347 el cual es compatible metalúrgicamente con el metal base.

La calidad con la cual se llevó a cabo la soldadura está en función de la calificación del soldador, en éste caso el soldador esta calificado en base al Código ASME, Secc. IX, 1998, IWB-4.2.



Esquema 3.1

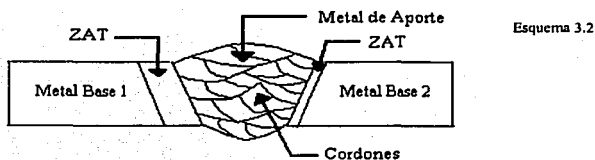
Fig.3.1 Fotografía de la unión soldada
AISI 347 / AWS ER-347 / AISI-347
Se observa el metal de aporte, metal base, ZAT y
diferentes cordones



Aumento: 10 x
Ataque Electroquímico: CrO₃ 5%

La unión soldada AISI 347 / AWS ER-347 / AISI 410 se muestra en la figura 3.2. Se observan los dos tipos de metal de aporte (AISI 347 y AISI 410), se tienen diferentes dimensiones de la zona afectada térmicamente porque depende de la cantidad de calor transmitido. Este calor transmitido está en función de la conductividad térmica de los diferentes aceros utilizados.

También se muestra el material de aporte (AWS ER-347) y la cantidad de cordones. A pesar de que la aplicación se llevó a cabo por personal calificado según ASME, el exceso del número de cordones repercute en el aumento de contracciones y un mayor endurecimiento.



Metal Base 1: AISI 410
Metal Base 2: AISI 347

Fig3.2 Fotografía de la unión soldada AISI 410 / AWS ER-347 / AISI-347. Se observa el metal de aporte, metal base, ZAT y diferentes cordones



Aumento: 10 x.
Ataque Electroquímico CrO₃ 5%

La figura 3.3 corresponde a la unión soldada AISI 1026 / AWS ER 70S-2 / AISI 1026, se observa el metal base, metal de aporte, tres cordones y se define la primera línea de fusión.

Se considera que el efecto de un segundo cordón sobre el primero implica un normalizado que produce una estructura con menor cantidad de ferrita, haciendo visibles las segundas líneas de fusión.

La aplicación de la soldadura fue realizada por soldadores calificados en base al Código ASME, Secc IX "Welding and Brazing Qualifications".

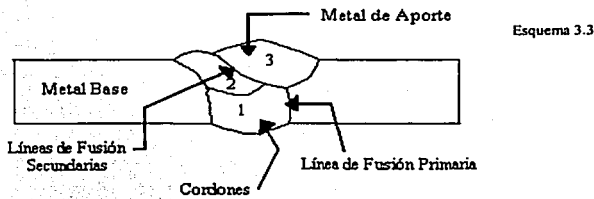
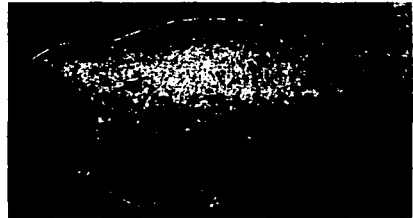


Fig.3.3 Fotografía de la unión soldada
AISI 1026 / AWS ER 70S-2 / AISI 1026
Se observa la líneas de fusión primaria y
secundarias.

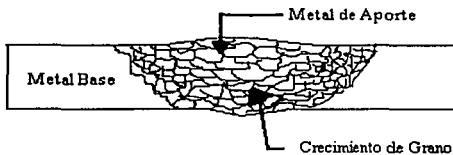


Aumento 10x
Ataque: Nital 5%

La cuarta unión soldada que se presenta, corresponde a los materiales ASTM-T22 / AWS ER 502 / ASTM-T22. Con éste aumento se observa un crecimiento de grano conforme al gradiente de temperaturas alcanzado en la soldadura.

Este tipo de unión es susceptible a fallar por el tipo de grano alcanzado en la Zona Afectada Térmicamente (ZAT):

Es importante señalar que una correcta selección del material de aporte tiene una consecuencia directa en la ZAT y esta fuera dl alcance de la calificación del soldador.



Esquema 3.4



Fig.3.4.Fotografía de la unión soldada
ASTM-T22 / AWS ER-502 / ASTM-T22
Se observa crecimiento de grano

Aumento: 10x
Ataque:Electroquímico: CrO₃ 5%

3.2 Gráficas de Durezas

El realizar gráficas de durezas a lo largo de la unión soldada (Barrido de durezas) es una prueba práctica que muestra una idea del grado de fragilidad, principalmente en la ZAT ya que se genera un alto nivel de tensiones residuales por transformaciones de fase y por cambios de volumen.

Las gráficas de barrido de durezas son una herramienta para contar con un panorama del efecto del tiempo crítico de temple. Un aumento en la dureza generalmente indica un aumento en la fragilidad y disminución en la ductilidad.

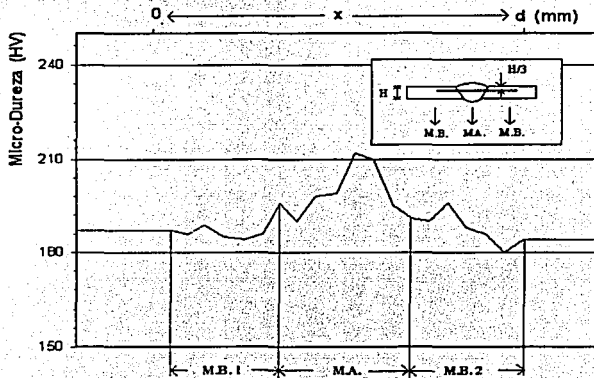


Fig.3.5 Gráfica de unión Soldada
AISI 347 / AWS ER-347 / AISI 347.

M.B.1= Metal de Base AISI 347
M.B.2= Metal de Base AISI 347
M.A.= Metal de Aporte AWS ER-347

En la figura 3.5 se presenta un incremento en la dureza del metal de aporte (M.A.), este aumento se debe al metal de primera fusión que se enfría rápidamente formando delta ferrita interdendrítica, que es una estructura bifásica.

El frenado de dislocaciones en la estructura bifásica tiene como consecuencia el incremento en la dureza.

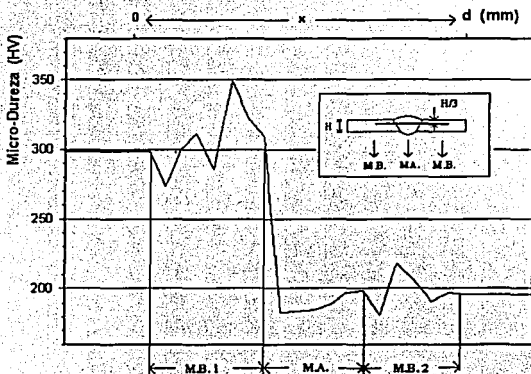


Fig. 3.6 Gráfica de unión Soldada
AISI 410 / AWS ER-347 / AISI 347.

M.B.1 = Metal de Base AISI 410
M.B.2 = Metal de Base AISI 347
M.A. = Metal de Aporte AWS ER-347

En la figura 3.6 se aprecia que la dureza del acero AISI 410 es mucho mayor en comparación con el metal de aporte (AWS ER-347) y el otro metal base (AISI 347). Este aumento se debe en el tipo de acero; ya que el AISI 347 es un acero inoxidable austenítico (Cr: 16-25%, Ni: 6-25%, C: 0.08-0.25%); su dureza es relativamente baja (18Rc). La estructura austenítica debe principalmente al Ni y otros elementos de aleación por ejemplo el Mn y el C que son alentos gamágenos.

Por el contrario en el caso del acero AISI 410 es un acero inoxidable martensítico (12%Cr) por lo que este tipo de aceros se templean por enfriamiento desde temperaturas elevadas, por lo que su dureza se debe a la presencia de la martensita de cromo.

Esta martensita de cromo de alta dureza tiende a producir grietas debido a la contracción, durante el enfriamiento y la posterior expansión al transformarse la austenita a martensita, por lo que es recomendable soldar precalentando el metal, manteniendo una alta temperatura de interpaso y haciendo un postcalentamiento para revenir la martensita formada.

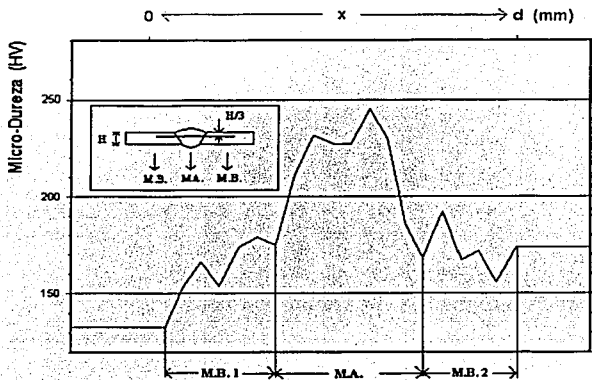


Fig.3.7 Gráfica de unión Soldada
AISI 1026 / AWS ER70S-2 / AISI 1026

M.B.1= Metal de Base AISI 1026
M.B.2= Metal de Base AISI 1026
M.A.= Metal de Aporte AWS ER70S-2

En la figura 3.7 ilustra el barrido de durezas que en el caso del acero AISI 1026 es un acero al carbón en donde la microestructura corresponde a ferrita con un bajo nivel de dislocaciones por deformación debido al efecto de recocido generado por la temperatura del arco eléctrico obteniéndose valores de dureza entre 150 y 200 micro HV.

El ligero aumento de dureza con respecto a la del metal base se debe principalmente a la formación de estructura tipo Wittmasstätten; que es una ferrita alotrópica acicular nucleada en las

fronteras de los cristales de austenita previa, la red cristalina se encuentra distorsionada debido al tiempo tan corto de solidificación que restringe la difusión de los átomos del metal

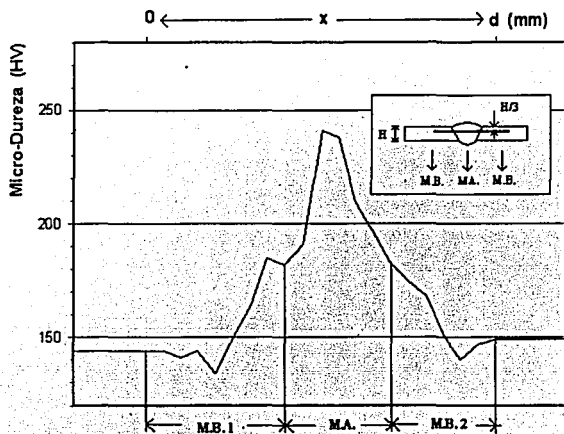


Fig.3.8 Gráfica de unión Soldada
ASTM-T22 / AWS ER-502 / ASTM-T22

M.B.1= Metal de Base ASTM-T22
M.B.2= Metal de Base ASTM-T22
M.A.= Metal de Aporte AWS ER-502

La última unión corresponde a la unión soldada de un acero de baja aleación (ASTM-T22) como metal base, con un acero de alta temperatura (AWS ER-502) como metal de aporte.

En la figura 3.8 se muestra un aumento en la dureza en el área del metal de aporte, que se debe al contenido de cromo de éste acero (4.5-6.0% Cr) con formación de la martensita de cromo.

3.3 Microestructura

Para determinar si existe compatibilidad metalúrgica en las diferentes uniones soldadas se presenta el análisis de cada una de las uniones en relación al metal base y metal de aporte.

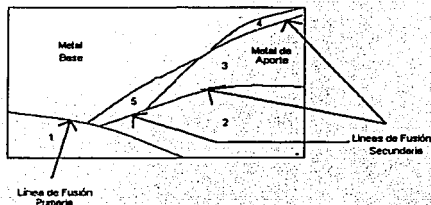
a) Unión Soldada AISI 347 / AWS ER-347.



Aumento:50x
Ataque Electroquímico: CrO₃ 9 V.

Fig.3.9 Fotografía de la unión soldada AISI 347 / AWS ER-347. El esquema 3.5 muestra las diferentes zonas de la unión soldada.

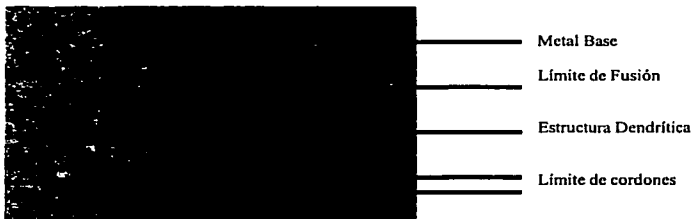
Esquema 3.5



En la figura 3.9 se presenta una fotografía panorámica de la unión soldada AISI 347 / AWS ER-347 donde se aprecian el metal de aporte, el metal base, la línea de fusión primaria (metal base-metal de aporte) y líneas de fusión secundaria (límites de cordones superpuestos), estas líneas se distinguen debido a que el metal de los cordones superpuestos durante la soldadura de

multipaso vuelve a formar zonas de fusión y son las afectadas por el calor en los cordones depositados con anterioridad, el esquema 3.5 muestra cinco cordones superpuestos.

El metal base presenta una estructura austenítica y el metal de aporte presenta crecimiento dendrítico observándose cristales de delta ferrita interdendríticos.



Aumento: 100x
Ataque Electroquímico: CrO_3 9 V.

Fig.3.10 Fotografía de la unión soldada AISI 347 / AWS ER-347.
Se observa la estructura dendrítica en el metal de aporte así como el límite de fusión.

En los aceros inoxidable existe una transformación peritéctica , como se puede apreciar en el diagrama pseudobinario (Fig 1.8) en el cual se mantiene el contenido de Fe constante a 68%, variando el porcentaje de Cr (elemento alfa) y Ni (elemento gamma). El acero en estudio se ubica en la región III, considerando que el efecto del Niobio corre a la izquierda las líneas de transformación en el diagrama pseudobinario. En la región III se encuentra la delta ferrita (δ).

En la figura 3.10 se muestra el límite de fusión primaria, existe una zona de mezcla entre el metal base (AISI 347) y el metal de aporte (AWS ER-347) presentando un crecimiento epitaxial.

En las líneas secundarias de fusión se presenta un crecimiento dendrítico donde varía el contenido de δ en función de la temperatura alcanzada y de la velocidad de enfriamiento de cada uno de los cordones (Ver Fig 1.8). Además se presenta un crecimiento dendrítico mas fino en dirección a la línea de fusión con menor cantidad de δ .

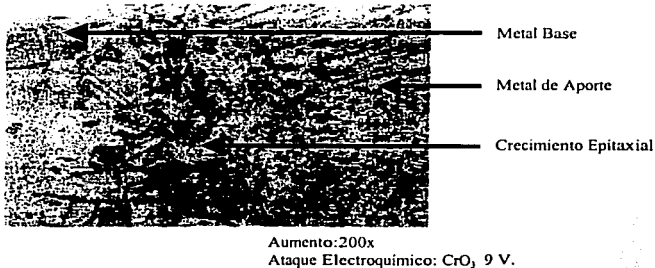


Fig.3.11 Fotografía de la unión soldada AISI 347 / AWS ER-347.
Se observa el crecimiento epitaxial en la zona de fusión.

En la figura 3.11 se muestra la línea de fusión primaria, con crecimiento epitaxial debido a la semejanza en composición química del metal base (AISI 347) y el metal de aporte (AWS ER-347) por lo que se presenta compatibilidad metalúrgica.

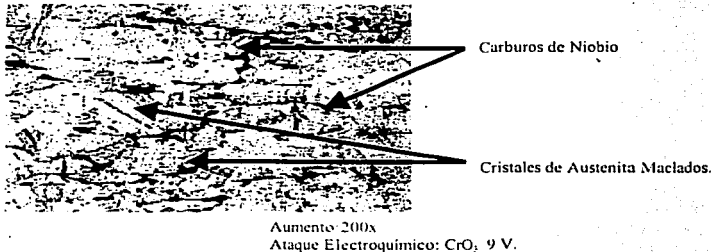


Fig.3.12 Fotografía de la unión soldada AISI 347 / AWS ER-347.
Se observa los carburos de Nb y los cristales de austenita maclados en el metal base.

El metal base bajo estudio es un acero inoxidable austenítico (AISI 347) la microestructura corresponde a una matriz austenítica y en la zona afectada térmicamente se presentan además, maclas de recocido; (Fig 3.12). También se observa la presencia de inclusiones de carburos de Niobio alineadas.

La presencia del Niobio es un elemento estabilizador porque evita la formación de carburos de Cromo, sin embargo aumenta la propensión a la fisuración por el efecto de formación de películas interdendríticas en la etapa final de solidificación.

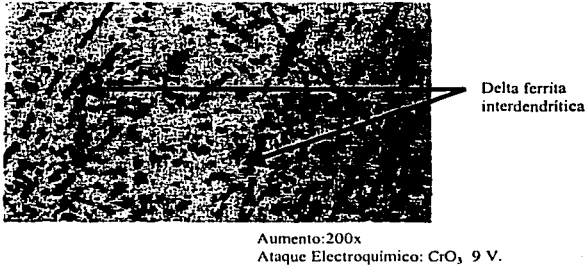


Fig.3.13 Fotografía de la unión soldada AISI 347 / AWS ER-347.
Se observa en el metal de aporte la δ ferrita interdendrítica

En la estructura bifásica lo primero en solidificar es la austenita y como el enfriamiento es muy rápido solo parte de ésta austenita se transforma en delta ferrita, esto es importante debido a que la diferencia en celda cristalinas provoca corrosión galvánica entre cristales.

El contenido de δ depende fundamentalmente de la composición química especialmente del balance entre sus elementos gamagenos, que se expresan en Ni equivalente y los alfa genos, que se expresan en Cr equivalente. El diagrama de Schaeffler relaciona el Ni equivalente y el Cr equivalente permitiendo así la evaluación del contenido de δ de las partes no diluidas del cordón y también de aquellas zonas en dilución con el metal base.

Los cálculos realizados para la determinación de δ teórica se reflejan en la figura 1.9, se observa un área que presenta una microestructura específica. La delta ferrita es magnética por lo tanto se determinó en forma experimental el porcentaje de δ en la unión soldada (3%). El contenido de δ tiene ventajas y desventajas ya que por una parte forma par galvánico pero sin su existencia tiende a fisurarse en caliente. La AWS ha establecido que el contenido de δ aceptable es entre 5 y 10%.

En la figura 3.13 se observa la delta ferrita interdendrítica en el metal de aporte y que corresponde a la unión soldada AISI 347-AWS ER-347.

Por microscopía electrónica de barrido se obtuvieron los siguientes resultados:

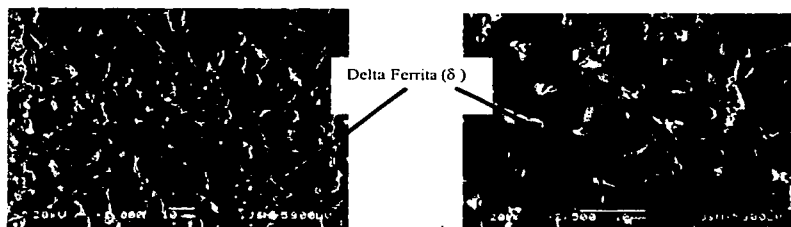


Fig.3.14 Fotografía de la unión soldada
AISI 347 / AWS ER-347.
Se observa la formación de δ ferrita

La delta ferrita (Fig 3.14) se forma a temperaturas por encima de 1390°C, su estructura cristalina corresponde a una cúbica centrada en el cuerpo (bcc, por sus siglas en inglés). La cantidad presente proviene del metal de aporte en estado líquido y depende de su composición química y de su velocidad de enfriamiento.

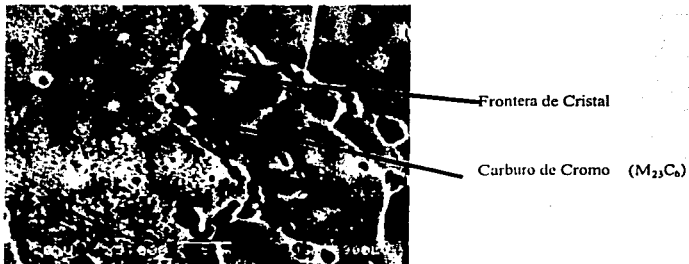


Fig.3.15 Fotografía de la unión soldada AISI 347 / AWS ER-347.
Se observa los carburos de Cr.

En la Fig. 3.15 se presenta por microscopía electrónica de barrido la línea de fusión, observándose además de la frontera de cristal y la precipitación de carburos de cromo ($M_{23}C_6$)

Al realizar la soldadura se obtiene un gradiente de temperaturas que va desde la temperatura de fusión hasta temperatura ambiente, durante el enfriamiento de la zona afectada térmicamente la temperatura se desplaza entre 425 y 800 °C que corresponde al intervalo de temperaturas en que el carbono en solución se combina con el cromo formando cristales de carburo de cromo que se acomodan en los límites de grano en la matriz austenítica.

Debido a la gran cantidad de cromo que se subtrae de la fase metálica al formarse los carburos, el contenido de Cr disminuye marcadamente en las zonas adyacentes a las fronteras de cristal de autenita favoreciendo la corrosión intergranular.

En la figura 3.15 se observan separación de granos así como carburos de cromo del tipo $M_{23}C_6$, precipitados en la frontera de cristal, por ello que normalmente se recomienda que al soldar aceros inoxidables se enfríe lo más rápido posible para evitar la formación de carburos de cromo.

b) Unión Soldada AWS ER-347 / AISI 410.

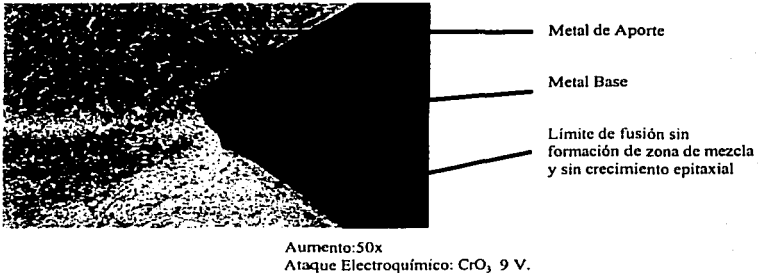


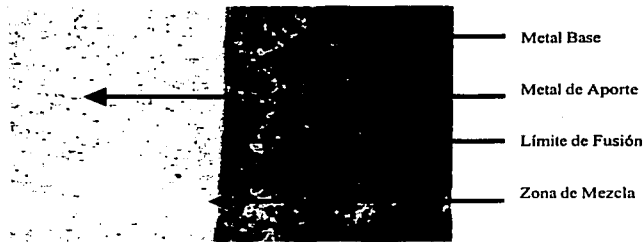
Fig.3.16 Fotografía de la unión soldada AWS ER-347 / AISI 410.
Se observa el límite de fusión.

En la figura 3.16 se muestra una fotografía panorámica de la unión soldada AWS ER-347 / AISI 410. El metal de aporte es AWS ER-347 y el metal base es el acero AISI 410, es un acero inoxidable martensítico (12% Cr).

En base a la extrapolación del Diagrama de Enfriamiento Continuo para Soldadura (Fig1.14) su tiempo crítico de temple es de 47.21 minutos (2833 seg.) por lo que la formación de martensita esta presente en la microestructura; en soldadura los tiempos de enfriamiento son fracciones de segundos por lo que hay tiempo suficiente para la formación de martensita de cromo.

Debido al temple por enfriamiento a altas temperaturas la estructura esperada es martensítica, razón por la cual a éste tipo de aceros se le llaman "aceros martensíticos".

En aceros martensíticos se recomienda el precalentamiento y el poscalentamiento, ya que en la soldadura se forma martensita de gran dureza produciendo fragilidad y grietas debido a la contracción.



Aumento: 100x
Ataque Electroquímico: CrO_3 , 9 V.

Fig.3.17 Fotografía de la unión soldada AISI 410 / AWS ER-347.
Se observa el límite de fusión y la zona de mezcla

En base a la figura 3.17 donde se muestra la fotografía de la unión soldada AISI 410 / AWS ER-347 se observa que no existe compatibilidad entre los dos aceros. La microestructura del metal de aporte es austenítica, cúbica centrada en las caras con número de coordinación 12; y la del metal base corresponde a una martensita de cromo, que es una estructura metaestable con número de coordinación 8, con una alta dureza (Fig 3.6)

Un análisis de éste tipo de unión soldada orienta acerca de la compatibilidad metalúrgica de los materiales a unir en función de su microestructura y su red cristalina. En el caso de la unión soldada AISI 410 / AWS ER-347, a pesar de que existe una pequeña zona de mezcla no es suficiente para establecer una compatibilidad adecuada, sobre todo porque el tipo de red cristalina en el metal base es diferente que la del metal de aporte y durante el proceso de soldadura no hay tiempo para que los dos metales se mezclen formando una aleación intermedia en cuanto a su composición química.

En el Diagrama de fases Fe-Cr (Fig1.25) se puede observar que con un contenido de 12% de cromo la aleación se encuentra dentro de la bolsa γ ; esto hace que con un enfriamiento rápido

la transición $\gamma \rightarrow \alpha$ se vea interrumpida con la siguiente formación de martensita (α' , ortorrómbica centrada en el cuerpo) sin que exista carbón en la aleación.

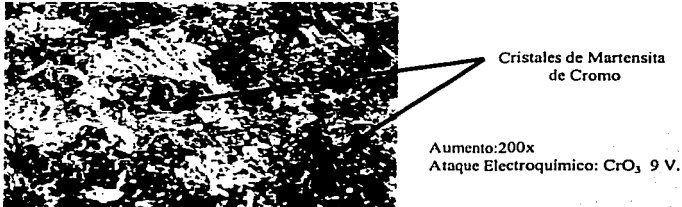


Fig.3.18 Fotografía de la unión soldada AISI 410 / AWS ER-347.
Se observa los cristales de martensita de cromo

La figura 3.18 muestra una estructura martensítica de cromo con matriz de austenita en el metal base (AISI 410). Las placas de martensita se nuclean en la frontera de los granos de austenita previa formada durante el ciclo de calentamiento del arco eléctrico.

En base a la extrapolación del diagrama de enfriamiento continuo para soldadura y la figura 1.14 se observa que el tiempo crítico de temple es suficientemente largo como para que la formación de la martensita sea inevitable si no hay un precalentamiento adecuado.

En el límite de la fusión de la unión soldada, se presenta microfisuración intercrystalina debido a que el coeficiente de expansión térmica de δ es distinto al de la austenita.

En la Fig. 3.19 se presenta la imagen de microscopía electrónica de barrido de una fisura que se encuentra alineada en el límite de fusión, esta fisura tiene su origen en la diferencia entre la red cristalina del metal base y el metal de aporte, que se produce durante la fase final de la solidificación, como consecuencia de la extracción rápida de calor del metal parcialmente solidificado sometido a tensiones de contracción.

En ésta unión se determinó teórica y experimentalmente la cantidad de delta ferrita (en base al diagrama de Schaeffler).

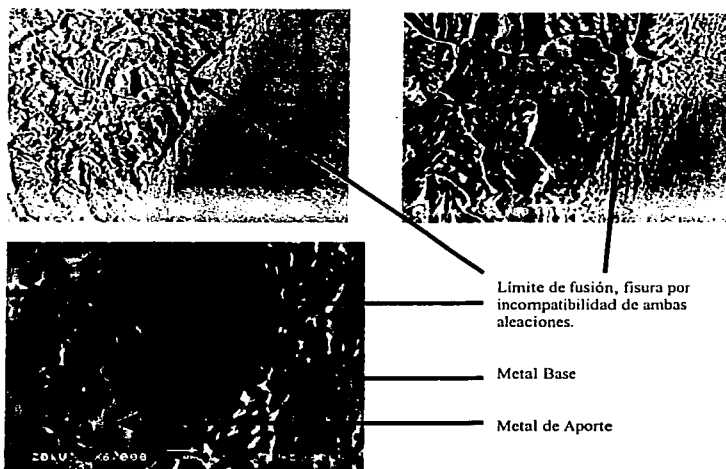


Fig.3.19 Fotografía de la unión soldada AISI 410 / AWS ER-347.
Se observa la fisura por incompatibilidad metalúrgica.

c) Unión Soldada AISI 1026 / AWS ER70S-2.

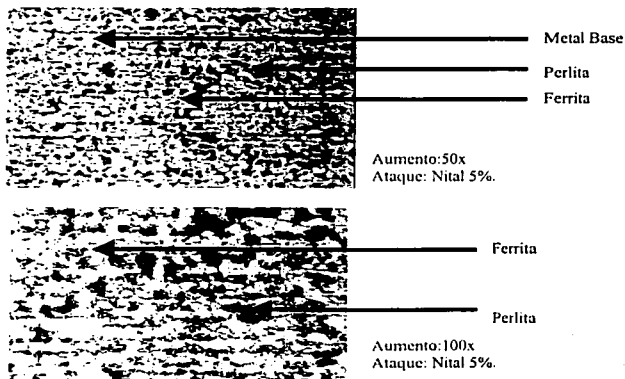


Fig.3.20 Fotografía de la unión soldada AISI 1026 / AWS ER70S-2.
Se observa el metal de aporte.

La unión soldada AISI-1026 / AWS ER70S-2 corresponde a un acero al carbón (0.08-0.15%C), en la figura 3.20 se muestran dos fotografías a diferentes aumentos del metal base AISI 1026, se observa que el material fue previamente laminado en frío.

En base al Diagrama de Enfriamiento Continuo para Soldadura (Fig 1.10), en éste tipo de aceros las curvas de transformación de ferrita y perlita se encuentran desplazadas hacia la izquierda, por lo que tiempo crítico de temple es prácticamente inexistente, debido a esto, no importa que la velocidad de enfriamiento sea muy rápida, siempre se tendrá una microestructura ferrítica-perlítica en la zona afectada térmicamente ya que la curva de enfriamiento en todos los casos cruzará primero la línea de transformación de ferrita y perlita que la línea M_s .

La figura 3.20 muestra una perlita dispersa debido a que el calentamiento se llevó a cabo en la zona intercrítica entre las temperaturas A_{c1} y A_{c3} , lo que dio como resultado una transformación parcial del metal base durante el calentamiento y por consecuencia una formación defectuosa de las fases durante el enfriamiento.

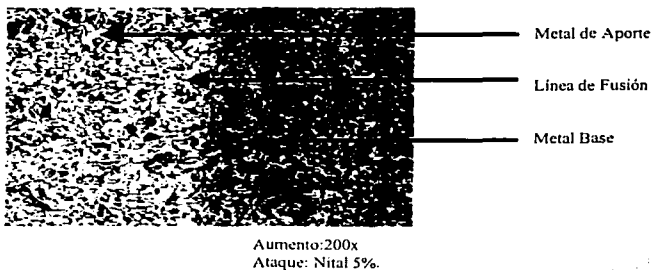


Fig.3.21 Fotografía de la unión soldada
AISI 1026 / AWS ER70S-2.
Se observa la línea de fusión

En la figura 3.21 se muestra el metal base AISI 1026 y el metal de aporte AWS ER70S-2, en la zona afectada térmicamente, en la línea de fusión donde se presenta crecimiento epitaxial

debido a que el material de base y el tienen composición química muy semejante y la misma estructura cristalina.

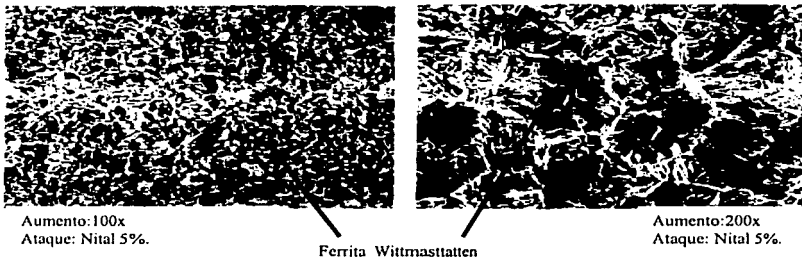


Fig.3.22 Fotografía de la unión soldada
AISI 1026 / AWS ER70S-2.
Se observa la ferrite Wittmastatten

En el metal de aporte presenta estructura Wittmastatten (Fig.3.22), que es una ferrita alotrópica en forma de placas formada por un enfriamiento rápido como el que se presenta en soldadura, nucleada en las fronteras de grano de la austenita. La composición química de la ferrita Wittmastatten es la misma que una ferrita idiomorfa aunque sus propiedades mecánicas son muy diferentes

d) Unión Soldada ASTM T-22 / AWS ER-502

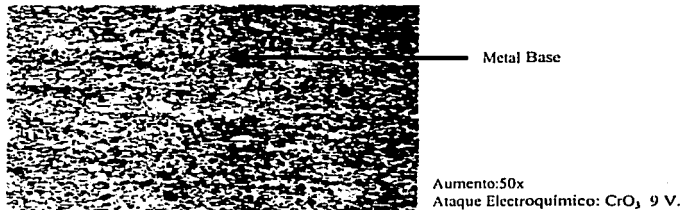


Fig.3.23 Fotografía de la unión soldada
ASTM T-22 / AWS ER-502.
Se observa el metal base.

El metal base que corresponde a un acero ASTM T-22, se trata de un acero de baja aleación (2-2.5% Cr, 0.9-1.2% Mo) con microestructura ferrítica. En la figura 3.23 se muestra el metal base correspondiente a la unión soldada ASTM T-22 / AWS ER-502.

En base al Diagrama de Enfriamiento Continuo para Soldadura (Fig 1.11) se determina un tiempo crítico de temple de 8 segundos; tiempo suficiente para cruzar la línea de transformación M_s y observando las curvas de enfriamiento se aprecia que es posible la formación de bainita.



Fig.3.24 Fotografía de la unión soldada
ASTM T-22 / AWS ER-502.
Se observa la cementita esferoidizada.

La zona afectada térmicamente se muestra en la Fig 3.24; se aprecia refinación de grano en la ferrita, y cementita esferoidizada en la zona intercritica de acuerdo al diagrama (Fig 1.11) entre las líneas A_{C1} y A_{C3} .

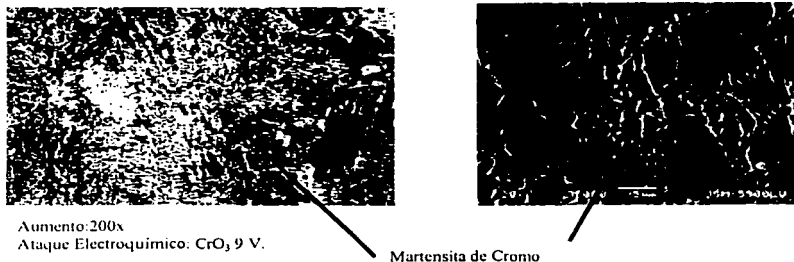


Fig.3.25 Fotografía de la unión soldada
ASTM T-22 / AWS ER-502.
Se observa la martensita de cromo.

El tipo de unión entre el aceros de baja aleación (ASTMT-22) y el acero de alta temperatura (AISI 502) se ve afectada por su diferente estructura cristalina, presentándose una diferencia marcada de dureza por formación de la martensita de cromo en el metal de aporte. En la figura 3.25 se muestra una fotografía de la martensita de cromo por microscopía metalográfica y microscopía electrónica de barrido.

IV CONCLUSIONES

- Para correcta selección del metal de aporte a utilizar en las uniones soldadas, se debe considerar las características metalúrgicas además de las condiciones de trabajo.
- La compatibilidad metalúrgica de los metales de aporte en las uniones soldadas, esta en función del tipo de microestructura que se obtiene por enfriamientos rápidos característicos de la soldadura por arco
- El crecimiento epitaxial en la línea de fusión es la característica más importante que indica compatibilidad metalúrgica en la unión soldada AISI 347 / AWS ER-347 / AISI 347.
- La diferencia entre las estructuras cristalinas del acero AWS ER-347 (fcc) y el acero AISI 410 (bcc) en la línea de fusión produce tensiones de contracción dando lugar a un alto riesgo de fisuración.
- El acero al carbón AISI 1026 soldado con el metal de aporte AWS ER70S-2 presenta una buena unión soldada debido a la compatibilidad microestructural, y las curva de enfriamiento en todos los casos cruzan las líneas de transformación de ferrita y perlita sin la posibilidad de formar martensita.
- La presencia de la martensita de cromo en la unión soldada ASTM T-22 /AWS ER-502 / ASTM T-22 es crítica por la dureza que se llega a tener en la zona afectada térmicamente.

V BIBLIOGRAFÍA

- H.B.Cary., "Modern Welding Technology", Prentice Hall, New Jersey. 1979.
- The Lincoln Electric Company., "The Procedure Handbook of Arc Welding". 12ª Ed. 1973.
- G.E.Linnert., "Welding Metallurgy", American Welding Society, New York., 1965.
- J.F.Lancaster., "Metallurgy of Welding", Allen and Unwin, London. 4ª Ed. 1987.
- Von Boese, Werner, Wirtz., "Das Verhalten der Stähle beim Schweißen" (El comportamiento de los aceros durante la soldadura), Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf, 3ª Ed. 1980.
- F.W.Strassburg., "Schweißen Nichtrostender Stähle"(La soldadura de los aceros inoxidable), Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf, 2ª Ed. 1982.
- R.W.Messler., "Principles of Welding", John Wiley and Sons, New York. 1999.
- K.Easterling., "Introduction to the Physical Metallurgy of Welding", Butterworth. 1992.
- Hrivňák., "Theory of Weldability of Metals and Alloys", Elsevier, Amsterdam.1992.