



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**“FASES CRISTALINAS Y ESTRUCTURA GRANULAR
EN LA SOLDADURA ENTRE PLACAS DE Zn-22Al-2Cu”**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERIA (METAL MECANICA)

PRESENTA

SERGIO MARTÍN DURÁN GUERRERO

ASESOR: DR. JAIME HINOJOSA TORRES

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MEX.

2008



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: Dr. Víctor Manuel Castaño Meneses

Vocal: Dr. Jaime Hinojosa Torres

Secretario: Dr. Juan Manuel Aceves Hernández

1^{er} Suplente: M. I. Armando Morales

2^{do} Suplente: M. I. José Frias Flores

Lugares donde se realizó la tesis:

Laboratorio de Manufactura de la FES Cuautitlán.

Laboratorio de Materiales de la FES Cuautitlán.

Centro de Asimilación Tecnológica (CAT).

Laboratorio de Microscopía Electrónica del CFATA.

TUTOR DE TESIS

Dr. Jaime Hinojosa Torres

Agradecimientos

Al Dr. Jaime Hinojosa Torres:

Tutor y asesor, por su tiempo, dedicación, paciencia y apoyo para la realización de este trabajo. Muchas gracias.

Al M. en I. Felipe Díaz del Castillo R.:

Por su apoyo en la realización de las muestras en el Laboratorio de Materiales, así como sus asesorías y amistad en la FES.

A la M en I.Q. Alicia del Real López y Q.M. Antonio Loeza Herrera:

Por su apoyo en el Laboratorio de Microscopía del CFATA, para la obtención del análisis en el Microscopio electrónico de barrido.

Al Ing. Armando Vázquez G.:

Por la asesoría para el manejo del equipo de soldadura TIG.

A todos aquellos que directa e indirectamente me han apoyado durante la realización de la parte práctica.

Gracias.

DEDICATORIA

Este trabajo esta dedicado principalmente a mi familia, a mi esposa Noemí, que me ha alentado e impulsado para realizar este trabajo. Gracias mi amor por el tiempo que me diste, las horas de desvelo, los viajes a Juriquilla, los fines de semana sin pasear. A mis hijas Andrea Teresa y Karina Ivonne, para que sigan estudiando con ahínco y dedicación, que no dejen nada a medias, y que lleguen a realizar todos sus sueños. Sigán adelante hijas.

A mis padres, Norberto Durán y Francisca Guerrero, que me dieron la vida, que han confiado en mi y que siempre me han apoyado. No los defraudare.

Con todo mi amor

GRACIAS

INDICE

	Pág.
Introducción	i
Capítulo 1	
Procesos de soldadura y técnicas de caracterización	
1.1 Soldadura al arco con electrodo de tungsteno y protección gaseosa	1
1.2 Difracción de rayos x	17
1.3 Solidificación celular y solidificación dendrítica	22
Capítulo 2	
Experimentación	
2.1 Material	29
2.2 Proceso de soldadura	29
2.3 Preparación de la sección transversal del cordón de soldadura para su observación al microscopio óptico	35
2.4 Preparación de la sección transversal del cordón de soldadura para su irradiación con rayos x	37
2.5 Preparación de la sección transversal del cordón de soldadura para su observación al microscopio electrónico de barrido y microanálisis	38
Capítulo 3	
Resultados y discusión	
3.1 Macrografías	40
3.2 Estructura granular	50
3.3 Difracción de rayos x	56
Conclusiones	75
Referencias bibliográficas	77
Glosario	79

INTRODUCCIÓN

Entre las aleaciones de alta resistencia la aleación Zn-22Al-2Cu (% peso) esta alcanzando una posición importante. Este logro es el resultado de numerosas investigaciones sobre este material metálico. La aleación es básicamente la aleación eutectoide del sistema Al-Zn modificada con cobre. La adición de cobre mejora las propiedades mecánicas de la aleación eutectoide y aumenta su resistencia al desgaste y a la corrosión. La superplasticidad es otra de las propiedades que posee esta aleación cuando es sometida a tensión bajo ciertas condiciones.

La densidad de la aleación Zn-22Al-2Cu puede tener valores entre 4.04 y 5.41 g/cm³, dependiendo del proceso de obtención. Esta aleación es menos pesada que los aceros y cuando se solidifica rápidamente sus propiedades mecánicas son superiores a las de algunos aceros. Por lo tanto, el uso de perfiles de esta aleación en estructuras requiere del conocimiento de sus propiedades mecánicas, las cuales dependen de su estructura granular y fases cristalinas que conforman los perfiles.

Como es sabido, en general la estructura de los sólidos depende de la forma en que cada sólido es obtenido; entonces, para los sólidos de esta aleación es importante conocer la historia de los mismos y cualquier cambio en su estructura cuando un proceso adicional es aplicado. De esta manera, cuando piezas de esta aleación son soldadas, la estructura de la zona donde se realiza la unión es modificada drásticamente con respecto a la del metal base.

Teóricamente todos los metales y aleaciones son soldables siempre que se aplique el procedimiento y la técnica adecuados. A veces se fracasa en el intento porque se pasa por alto alguno de estos dos factores, pero si se conocen la composición, la estructura y las propiedades, se estará en posibilidad de diseñar y

hacer mejores soldaduras, con lo que se observa la estrecha relación que existe entre la metalurgia del material metálico y su soldabilidad.

Debido a que no existe información acerca de la soldadura de la aleación Zn-22Al-2Cu, nos dimos a la tarea de analizar por separado cada uno de los metales involucrados. Se hicieron varias pruebas con diferentes equipos de soldadura hasta encontrar el más apropiado. Después de un arduo trabajo experimental, la Soldadura al Arco con electrodo de Tungsteno y protección Gaseosa (SATG) resultó ser la técnica más apropiada para llevar a cabo la soldadura entre piezas de la aleación Zn-22Al-2Cu. En esta técnica, un arco eléctrico es formado entre el electrodo de tungsteno y el metal base. La región del arco es protegida con un gas inerte (Ar, He, H). Una corriente eléctrica es aplicada para calentar el electrodo de tungsteno que a su vez emite los electrones necesarios para provocar el arco eléctrico. Aunque el proceso SATG es usado para obtener una buena apariencia y alta calidad de la soldadura, cabe aclarar que este proceso no es práctico.

De acuerdo a lo anterior, la intención de este estudio es mostrar las modificaciones a la estructura que sufre el metal base en la zona de fusión, mediante el empleo del proceso de soldadura al arco con electrodo de tungsteno y protección gaseosa, y las fases cristalinas que conforman dicha zona. Se espera que esta investigación sirva para incrementar el uso de este material, ya que las características obtenidas mediante las diversas formas de preparación han despertado un amplio interés; luego, en algunos casos, se requerirá de realizar la unión por soldadura o efectuar una simple reparación de las piezas de trabajo de esta aleación.

CAPÍTULO 1

Proceso de soldadura y técnicas de caracterización

1.1 Soldadura al arco con electrodo de tungsteno y protección gaseosa

Antes de comenzar la descripción del proceso de soldadura empleado, es necesario establecer la definición de soldadura: **La soldadura es “la unión de dos o más piezas de metal, con o sin material de aporte, aplicando calor y/o presión para fundirlos, de forma tal que se unan en forma permanente.**

Una vez establecida la definición de soldadura y dado que el objetivo de este trabajo es el de realizar la soldadura entre piezas de la aleación Zn-22Al-2Cu, analizar la estructura granular y determinar las fases cristalinas que aparecen en la zona de fusión, hubo que seleccionar primeramente, de manera razonada, el proceso de soldadura que más se adecuó a dicha aleación. Después de pruebas preliminares el proceso que mejores resultados produjo fue el de Soldadura al Arco con electrodo de Tungsteno y protección Gaseosa (SATG). Luego, en los párrafos siguientes se da una descripción general de dicho proceso; mientras que las condiciones experimentales específicas para nuestro material, usando este proceso de soldadura, se establecen en el Capítulo 2.

El proceso SATG es un proceso de soldadura que lleva a la coalescencia de metales o aleaciones por una fusión local producida por un arco eléctrico. La protección se obtiene con una cubierta de gas o mezcla de gases. Puede o no usarse presión y puede o no usarse un metal de aporte. Este proceso a veces se denomina soldadura TIG (del inglés Tungsten Inert Gas) y en Europa se le denomina soldadura WIG (del alemán Wolfram que significa tungsteno)(Figura. 1.1.1).

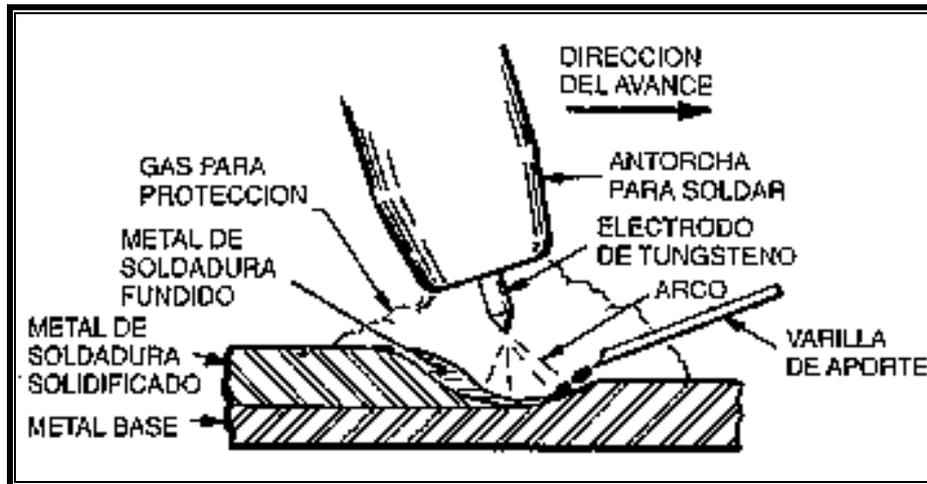


Figura 1.1.1 Esquema que muestra las partes principales de la Soldadura al Arco con electrodo de Tungsteno y protección Gaseosa.

El proceso SATG es muy versátil, puede usarse para soldar aleaciones ferrosas y una gran variedad de aleaciones no ferrosas. Este proceso puede usarse en todas las posiciones; la soldadura en una posición diferente a la posición plana depende del metal base, de la corriente para soldar y de la habilidad del soldador. Este proceso se desarrolló, inicialmente, para soldar “metales difíciles”; en la actualidad puede emplearse para soldar metales y aleaciones diversas y es de más aplicación que cualquier otro proceso de soldadura al arco. La SATG tiene un arco y un depósito de soldadura que son claramente visibles al soldador y no produce escorias. Como el metal de aporte no pasa a través del arco, existe poco o nada de salpicaduras. Debido a que el electrodo es no consumible, puede realizarse la soldadura fundiendo únicamente el metal base.

El proceso SATG se desarrolló comercialmente en 1930 para soldar aluminio y magnesio en la industria aeronáutica, usando helio como gas de protección y un electrodo de tungsteno. Al inicio se usó solamente corriente continua con un

electrodo positivo; sin embargo, el electrodo era propenso a sobrecalentarse y a depositar partículas en la soldadura. Luego se descubrió que el problema del sobrecalentamiento se evitaría con una conexión de electrodo negativo; esto resultó satisfactorio en la soldadura de los aceros inoxidables.

Durante la Segunda Guerra Mundial se desarrollaron máquinas para soldar con corriente alterna y estabilización con alta frecuencia. La corriente alterna con adición de alta frecuencia y una corriente de alto voltaje sobre la corriente básica, facilitaron una buena calidad de la soldadura del aluminio y del magnesio. El helio, que se usó en las primeras etapas de desarrollo, fue desplazado por el argón debido a una mayor disponibilidad de este último. El proceso de SATG llegó a ser ampliamente aceptado a comienzos de 1950. Este proceso está clasificado por la American Welding Society (AWS) como el proceso de soldadura al arco con electrodo de tungsteno y protección gaseosa.

El proceso SATG puede aplicarse con los métodos manual, semiautomático, mecanizado o automático. El **método manual** se usa en la gran mayoría de trabajos. En este método la antorcha es operada manualmente, y el metal de aporte, si se usa, se añade también manualmente. Un pedal (que controla la cantidad de corriente para soldar y permite el paso o interrumpe la corriente para soldar) es un refinamiento que puede añadirse a la soldadura manual. El proceso permite al soldador un control extremo para realizar un trabajo de precisión. El calor puede ser controlado con mucha precisión y el arco puede ser dirigido con bastante exactitud. Este proceso puede operarse también en **forma semiautomática** (cuando la antorcha es operada manualmente y el metal de aporte es añadido en forma automática por medio de un alimentador de alambres). El proceso SATG semiautomático se usa en raras ocasiones; sin embargo, los métodos mecanizados y automáticos se están haciendo cada vez más populares. La **soldadura mecanizada** se produce cuando el equipo realiza la soldadura bajo el control y la observación

del operador del equipo. La **soldadura automática** se produce cuando el equipo realiza la soldadura sin que se requiera el ajuste o control del operador del equipo. El grado de automatización o de mecanización depende de la accesibilidad a la junta, de los requerimientos del control de calidad, del número de soldaduras idénticas que deberán hacerse y de la disponibilidad de capital.

La SATG tiene ventajas sobre otros tipos de procesos de soldadura. Las principales ventajas son:

1. Este proceso producirá soldaduras de gran calidad en casi todos los metales y aleaciones.
2. No hay escoria, de modo que se requiere muy poca limpieza después de la soldadura.
3. No hay metal de aporte que pase a través del arco, de modo que hay poca salpicadura.
4. La soldadura puede realizarse en todas las posiciones.
5. No siempre se requiere metal de aporte.
6. Pueden usarse pulsos para reducir la entrada de calor.
7. El arco y el depósito de soldadura son claramente visibles al soldador.
8. Debido a que el metal de aporte no atraviesa el arco, la cantidad que se añade no depende del nivel de la corriente para soldar.

Entre las limitaciones del proceso SATG tenemos:

1. La velocidad de la soldadura es relativamente lenta.
2. El electrodo se contamina fácilmente.
3. El proceso no es muy eficiente para soldar secciones gruesas, debido a que las tasas de deposición son bajas.
4. El arco requiere ser protegido de las corrientes del viento, las cuales pueden hacer que el gas para protección se aleje del arco.

El proceso SATG usa el calor producido por un arco entre un electrodo de tungsteno y el metal base. El metal de soldadura fundido, la zona caliente de la soldadura y el electrodo están protegidos por un gas inerte que es suministrado a través de la antorcha. El gas desplaza al aire, de modo que el oxígeno y el nitrógeno del aire no entran en contacto con el metal fundido o con el electrodo caliente de tungsteno. Un arco eléctrico se produce por el paso de la corriente eléctrica a través de un gas ionizado. En este proceso los átomos del gas inerte se ionizan perdiendo electrones y quedando con una carga positiva. Los iones positivos del gas fluyen luego desde el polo positivo hacia el polo negativo, mientras que los electrones fluyen desde el polo negativo hacia el polo positivo del arco. El intenso calor desprendido por el arco funde el metal base y el metal de aporte (cuando se usa) para formar la soldadura. Posteriormente, a medida que se enfría el metal fundido ocurre la coalescencia y las partes se unen. Se produce muy poco o nada de salpicaduras y humos. La soldadura que resulta es suave, uniforme y requiere un acabado mínimo.

No se añade metal de aporte cuando se sueldan materiales muy delgados, juntas de canto y juntas de discos; esto se conoce como soldadura autógena. Para materiales más gruesos se usa generalmente una varilla “fría” o un metal de aporte alimentado externamente. El metal de aporte en la SATG no se transfiere a través del arco pero es fundido por efecto del arco.

El arco puede encenderse de tres formas. El primer método consiste en raspar brevemente el electrodo en la pieza de trabajo y luego retirarlo rápidamente hacia una corta distancia. El segundo método consiste en usar un dispositivo que provocará que el arco salte del electrodo a la pieza de trabajo. El tercer método consiste en usar un dispositivo que inicie y mantenga un pequeño arco piloto, este arco piloto facilita un camino ionizado para el arco principal. La antorcha se deja

en un lugar hasta que se forme el depósito de soldadura. Después de haberse obtenido una adecuada fusión en un punto, la antorcha se mueve a lo largo de la junta de modo que se unan los bordes adyacentes. El metal de soldadura se solidifica detrás del arco y a lo largo de la junta, completándose así el proceso de soldadura.

El equipamiento usado para el proceso de la SATG consta de una fuente de poder, una antorcha para soldar, un electrodo, cables de soldadura y el sistema del gas para protección. Existen diversos accesorios opcionales al equipamiento, pero que se usan a menudo; entre estos tenemos los recirculadores de agua, los reóstatos de tipo pedal, los programadores, los dispositivos para facilitar el movimiento, los osciladores, los controles automáticos del voltaje y los alimentadores de alambres. Ya que la SATG puede aplicarse por diversos métodos, es posible obtener una gran variedad de configuraciones del equipamiento. La Figura 1.1.2 muestra una configuración del equipamiento usado para la SATG manual.

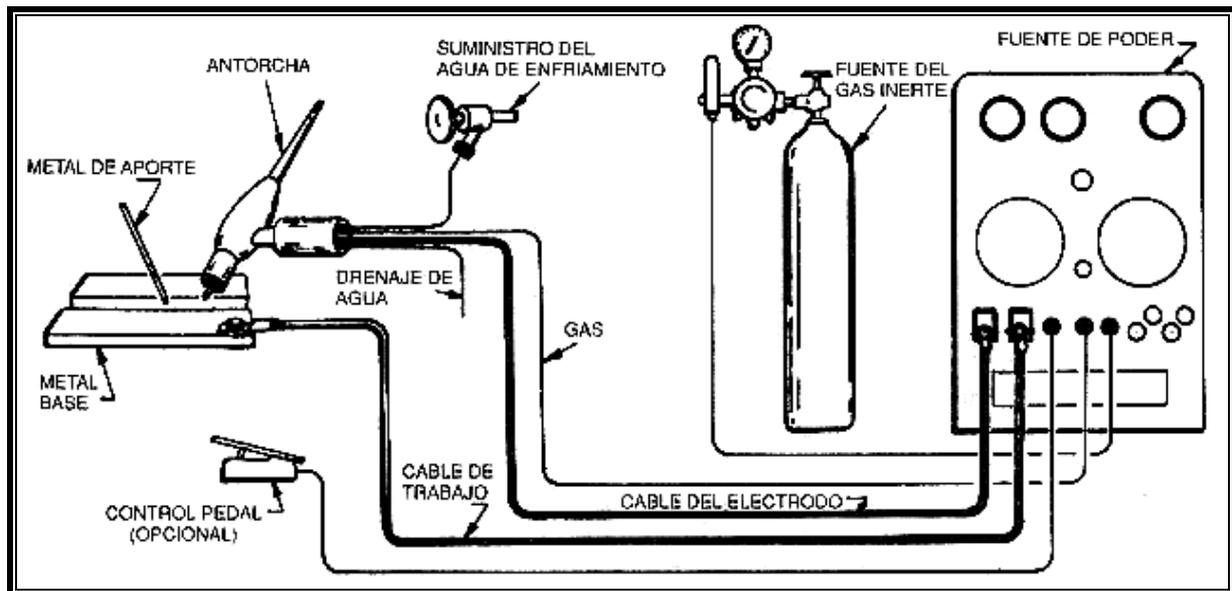


Figura 1.1.2 Equipamiento para soldadura al arco con electrodo de tungsteno y protección gaseosa.

La finalidad de una fuente de poder o máquina para soldar es facilitar la potencia eléctrica con un adecuado voltaje y corriente, que permitan mantener un arco para soldar. Se han diseñado diversos tamaños y tipos de fuentes de poder para la SATG. La mayoría de estas fuentes de poder opera con una entrada eléctrica de 230 ó 460 volts. Las fuentes de poder que operan con una entrada de 200 ó 575 volts se encuentran disponibles como opciones.

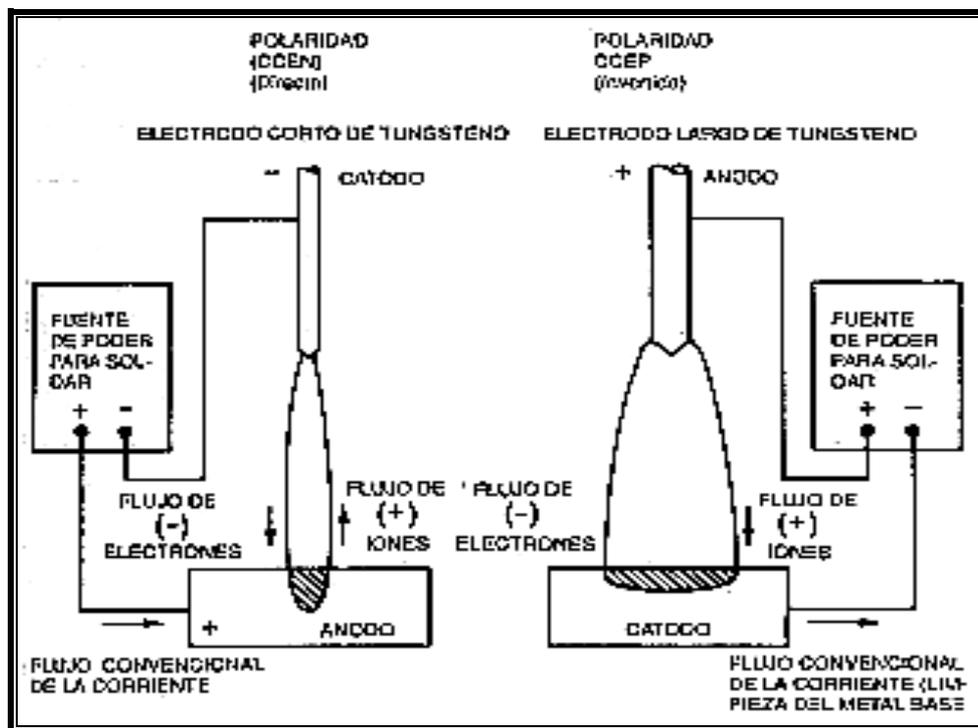
El tipo de corriente disponible está determinado por el tipo de fuente de poder. El factor más importante en la selección del tipo de corriente es el tipo de metal a soldarse. El espesor del metal puede también influir en la selección. La tabla 1.1.1 muestra el tipo de corriente usado para la soldadura de diversos metales base, junto con los tipos usados de electrodos y gases para protección. Para la SATG puede usarse corriente alterna o continua; asimismo puede usarse una

corriente para encendido del arco en alta frecuencia, ya sea con corriente alterna o continua. La corriente para soldar también puede ser pulsante.

TIPO DE METAL	ESPESOR	TIPO DE CORRIENTE	ELECTRODO	GAS PARA PROTECCIÓN
Aluminio	Todos Sólo gruesos Sólo delgados	CA CCEN CCEP	Puro, Zirconio Toriado Toriado, Zirconio	Argón, Argón-helio Argón-helio, Argón Argón
Cobre + Aleaciones de Cobre	Todos Sólo Delgados	CCEN CA	Toriado Puro, Zirconio	Argón, Argón-helio Argón
Aleaciones de Magnesio	Todos Sólo Delgados	CA CCEP	Puro, Zirconio Zirconio, Toriado	Argón Argón
Níquel + Aleaciones de Níquel	Todos	CCEN	Toriado	Argón
Aceros al Carbono Simple y de Baja Aleación	Todos	CCEN	Toriado	Argón, Argón-helio
Acero Inoxidable	Todos	CCEN	Toriado	Argón, Argón-helio
Titanio	Todos	CCEN	Toriado	Argón

Tabla 1.1.1 Tipos de electrodos de tungsteno y gases para protección recomendados para la soldadura de diferentes metales.

Puede usarse la corriente continua conectada de alguna de las dos siguientes formas: electrodo negativo (polaridad directa) y electrodo positivo (polaridad invertida). Las partículas cargadas eléctricamente fluyen entre la punta del electrodo y la pieza de trabajo, como se muestra en la Figura 1.1.3. La conexión de electrodo negativo puede usarse para soldar todo tipo de metales.



- Penetración profunda
 - Área fundida angosta
 - 30% de calor aprox. en el electrodo y 70% en el Metal Base
 - Nota: en CA, Arco: 50% calor en el electrodo y 50% en el metal base.
- Penetración poco profunda
 - Área fundida ancha
 - 70% del calor aprox. en el electrodo y 30% del calor en el Metal Base

Figura 1.1.3 La Polaridad Negativa y Positiva en la soldadura al arco con electrodo de tungsteno y protección gaseosa.

Pueden usarse procedimientos especiales para soldar las aleaciones de magnesio y de aluminio, los cuales tienen un óxido refractario superficial que dificulta su fusión. El aluminio y el magnesio pueden soldarse usando un arco corto, una conexión de electrodo negativo y un gas para protección que contenga helio. Los metales pueden soldarse más fácilmente usando la conexión de electrodo positivo, debido a que esta conexión destruye las capas de óxido en las superficies. El principal problema de usar la conexión de electrodo positivo es que la capacidad

de transporte de corriente del electrodo es sumamente baja. El electrodo empezará a fundirse si se usan corrientes demasiado altas. Por esta razón rara vez se usa la conexión de electrodo positivo, excepto para soldar planchas metálicas delgadas.

El método de la corriente pulsante en la SAGT emplea dos niveles de corriente en lugar de una corriente uniforme. La corriente para soldar cambia periódicamente entre los niveles alto y bajo, para producir una corriente o arco pulsante. Esta corriente pulsante produce un cordón de soldadura continuo, el cual está formado por puntos de soldadura superpuestos (Figura 1.1.4).

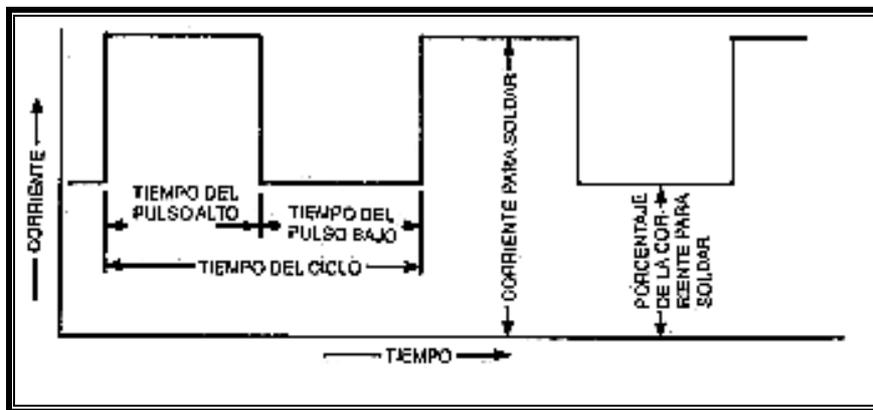


Figura 1.1.4 Terminología de la corriente pulsante

El método de la corriente pulsante de la SATG tiene diversas ventajas sobre la corriente continua uniforme en la soldadura de metales delgados. El método pulsante tolera un mayor desalineamiento de los bordes, puede usarse una configuración normal con los metales más delgados y también proporciona un mejor control de la distorsión y penetración en la raíz. En una soldadura abierta de raíz, el pulso alto facilita una mayor corriente para una completa penetración, mientras que el pulso bajo enfría el depósito, evitando las perforaciones en la raíz de la junta. La pulsación reduce la entrada de calor al metal base; esto es

particularmente bueno para soldar planchas delgadas de acero inoxidable (sin pulsaciones se producirían distorsiones muy fácilmente). Otra ventaja de la corriente pulsante es que ella es muy buena para soldar en la posición vertical y de sobrecabeza, debido a la buena penetración que se obtiene con un menor ingreso de calor. La pulsación evita que el depósito de soldadura se agrande, mediante la solidificación parcial que ocurre durante la corriente baja. El número de pulsos usados puede variar desde unos 10 por segundo hasta valores tan bajos como 1 ó 1.5 por segundo. La duración del tiempo que la corriente alta se mantiene, así como la duración del tiempo que la corriente baja se mantiene, pueden variarse; así mismo puede variarse el porcentaje de la corriente baja con respecto a la corriente alta.

La corriente alterna es una combinación de ambas polaridades, las cuales se alternan en ciclos regulares. En cada ciclo, la corriente se inicia en el valor cero, llega a un valor máximo en una dirección, disminuye nuevamente a un valor cero, llega a un valor máximo en la otra dirección y disminuye nuevamente a un valor cero. El arco se extingue en el punto cero del ciclo, de modo que se usa una corriente de alta frecuencia en el circuito de soldadura para reencender el arco. El uso de la corriente alterna proporciona las ventajas de la conexión electrodo positivo con corriente continua (polaridad invertida), sin que se tengan las limitaciones de corriente; también proporciona las ventajas de la conexión electrodo negativo con corriente continua, sin que tenga los problemas de limpieza de óxidos. Por esta razón la corriente alterna se usa generalmente para la soldadura manual del aluminio y del magnesio.

En el circuito de corriente alterna existe la tendencia de que la corriente llegue a hacerse desbalanceada. La corriente del arco fluye más fácilmente en una dirección debido a que se requiere una mayor energía para obtener electrones del metal base que del electrodo de tungsteno. El electrodo de tungsteno emite

electrones más fácilmente debido a que éste se calienta más durante la soldadura que el metal base. La amplitud de la corriente en el ciclo cuando el electrodo es negativo, es normalmente mayor que la amplitud durante el ciclo cuando el electrodo es positivo. Esto tiende a producir una corriente desbalanceada. Para balancear la corriente pueden usarse ya sea capacitores conectados en serie o puede incluirse un voltaje continuo en el circuito para soldar. En algunas aplicaciones, como la soldadura mecanizada a gran velocidad, es deseable tener una corriente balanceada; sin embargo, ésta no es necesaria en la mayoría de las aplicaciones de la soldadura manual. El flujo de una corriente balanceada tiene tres ventajas principales: (1) Una mejor acción de limpieza de los óxidos; (2) Una mejor y más suave acción para soldar; (3) No existe reducción en la salida nominal de un transformador convencional para soldar. Las desventajas de un flujo balanceado de la corriente son: (1) Se requieren electrodos más grandes; (2) Los sistemas para balancear ondas son más caros.

La corriente de alta frecuencia es una corriente separada, superpuesta, que se usa para mantener un arco piloto y ayudar a encender el arco. El arco piloto no realiza ninguna soldadura pero es necesario para encender el arco de soldadura sin que el electrodo toque la pieza de trabajo, ya sea cuando se usa corriente continua o corriente alterna. Cuando se usa corriente alterna, la alta frecuencia evita que el arco se extinga cuando la corriente alterna está cambiando de ciclo (ya sea del positivo al negativo o del negativo al positivo). Cuando se usa corriente continua, la alta frecuencia sólo se necesita para ayudar a encender el arco, y puede desconectarse después de que el arco se haya establecido. El uso de una corriente de alta frecuencia es el mejor método de encendido, debido a que cuando la punta del electrodo hace contacto con la pieza de trabajo, o cuando se hace el encendido sobre una pieza de carbón, el electrodo de tungsteno podría contaminarse.

Cuando se usa esta corriente superpuesta de alta frecuencia con la SATG tipo CA, se requiere tomar ciertas precauciones. Estas son necesarias debido a que los osciladores con pase de una chispa de alta frecuencia en las fuentes de poder, emiten potencia a frecuencias que podrían interferir con las emisiones radiales de tipo comercial, policial o aeronáutico. Por esta razón las operaciones con alta frecuencia en CA están sometidas al control de la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) en los Estados Unidos. En la mayoría de los otros países existen regulaciones similares.

Las máquinas para soldar que usan estabilizadores de alta frecuencia deberán instalarse teniendo un especial cuidado de proporcionar un sistema de tierra y una protección especial. Los fabricantes facilitan instrucciones especiales para la instalación, las cuales requieren que todos los conductores metálicos en el área deban también ponerse a tierra. Estos requerimientos ayudan a limitar la radiación en alta frecuencia.

Las antorchas para la SATG, diseñadas y usadas solamente para este proceso, están disponibles en diversos tipos y tamaños. Se usa la antorcha para soldar con la finalidad de conducir la corriente para soldar al arco, así como el gas para protección a la zona del arco. La antorcha usualmente incluye diversos cables, mangueras y adaptadores para conectar la antorcha a las fuentes de potencia, gas y enfriamiento. Las antorchas manuales deberán tener también un mango que le permita al soldador manipular el arco. La Figura 1.1.5 muestra una antorcha manual para SATG.



Figura 1.1.5 Antorcha manual para soldadura al arco con electrodo de tungsteno y protección gaseosa.

Las antorchas manuales pueden pesar tan poco como 85 gramos hasta aproximadamente 450 gramos. Se diseñan de acuerdo a la corriente máxima para soldar que ellas deban soportar. Pueden llevar diversos tipos y tamaños de electrodos y toberas. El ángulo que forma el electrodo y el mango (ángulo del cabezal) puede variar de una antorcha a otra. El ángulo más común del cabezal es 120 grados, aunque algunas antorchas pueden tener ángulos de cabezal de 90 grados y otras pueden tener cabezales ajustables. Existen dos tipos principales de antorchas para la SATG, a saber: enfriadas por aire y enfriadas por agua. Las antorchas enfriadas por aire son refrigeradas por el flujo del gas para protección (lo cual significa que realmente son enfriadas por un gas). El único enfriamiento por aire ocurre por efecto del calor que se irradia hacia la atmósfera. Las antorchas que son enfriadas por agua tienen una circulación de agua a través de ellas, lo cual facilita la mayor refrigeración y el resto es hecho por el gas para protección. Las antorchas enfriadas por aire son usualmente pequeñas, livianas y más baratas que

las antorchas enfriadas por agua. Estas generalmente tiene una corriente máxima de soldadura de 200 A y se usan normalmente para soldar metales delgados. Estas antorchas se usan para la soldadura con bajos ciclos de trabajo, pero son también más versátiles que las antorchas enfriadas por agua, debido a que no requieren agua. El electrodo de tungsteno se calienta más que en las antorchas enfriadas por agua, lo cual podría hacer que el tungsteno se transfiera a la soldadura, causando inclusiones. Las antorchas enfriadas por agua pueden operar continuamente hasta aproximadamente 200 A, y algunas están diseñadas para corrientes de soldadura de hasta 500 A. Estas antorchas son usualmente más pesadas y más caras que las antorchas enfriadas por aire. Comúnmente se suministra con la antorcha la manguera para agua y los conectores.

Existen cuatro tipos de toberas o boquillas que se usan para la SATG: toberas cerámicas, metálicas, de cuarzo fundido y de doble protección. Las toberas cerámicas son las más baratas y populares; sin embargo, ellas son frágiles. Son las más recomendadas para usarse con una corriente de alta frecuencia, con la finalidad de prevenir el daño a la tobera por el chisporroteo transversal. Las toberas metálicas pueden ser del tipo deslizante o enfriado por agua. El tipo deslizante está limitado a bajas corrientes de soldadura y donde no puedan usarse las toberas enfriadas por agua con una alta corriente de soldadura. Las toberas de cuarzo fundido son transparentes y algunos soldadores las prefieren debido a que ellas aumentan la visibilidad. El interior de la tobera puede dañarse por los vapores cuando el electrodo se contamina, lo cual dificulta la visión. La tobera de doble protección permite que una pequeña cantidad de helio o argón fluya alrededor del electrodo para proteger al depósito de soldadura recién formado. Alrededor de la parte central de la tobera una sección anular ranurada emite una atmósfera de bióxido de carbono o nitrógeno, para prevenir que el aire entre en contacto con la protección central del gas inerte. Esta se usa rara vez en la industria.

Dentro de la tobera está el orificio para el gas. El orificio para el gas consta de una serie de agujeros en el extremo del cuerpo de la boquilla (alrededor del electrodo), el cual suministra el gas para protección hacia la tobera. Esto proporciona un flujo más uniforme del gas para protección alrededor de la tobera. Los cabezales para soldadura orbital están diseñados específicamente para producir soldaduras de alta calidad en aplicaciones críticas de soldadura. Debido a que las compañías vinculadas a la industria aeronáutica, farmacéutica, de semiconductores, procesamiento de alimentos e industrias afines, requieren de una calidad superior de la soldadura en términos de forma del cordón, integridad y limpieza, estos sistemas avanzados llevan una tecnología computarizada para controlar las variables en una soldadura. La velocidad y el ancho de oscilación de la antorcha se ajustan independientemente y se sincronizan automáticamente para facilitar el posicionamiento preciso de la entrada del alambre en el depósito de soldadura. Los alimentadores compactos de alambres son controlados electrónicamente para facilitar la exactitud y las repeticiones.

El gas para protección puede suministrarse a partir de cilindros simples, sistemas de distribución portátiles o estacionarios, o por medio de tuberías conectadas a antorchas con almacenamiento a granel del gas. La forma más usada para controlar el flujo del gas es la combinación regulador-flujómetro. Se usan diferentes flujómetros para los diversos gases de protección. Se calibran de acuerdo a los diferentes gases para protección que se usan. Están diseñados para usarse con un gas específico y sólo deberán usarse con el gas para el cual ellos han sido diseñados. El gas para protección es conducido a la antorcha para soldar por medio de mangueras. Se usan mangueras plásticas debido a que el helio se difundirá a través de las paredes de las mangueras de caucho o de tela y caucho. Para estandarizar el sistema de las mangueras de caucho, también se usan estas mismas

para el argón. Las mangueras pueden conectarse directamente a la antorcha o a través de la fuente de poder o de un accesorio para el gas inerte hacia la antorcha.

Los cables para soldar y los conectores sirven para conectar la fuente de poder a la antorcha y a la pieza de trabajo. Estos son esencialmente los mismos que se usan en la soldadura al arco manual. Los cables normalmente se fabrican de cobre o aluminio; ellos constan de cientos de alambres finos que van dentro de una envoltura aislada de caucho natural o sintético. El cable que conecta a la pieza de trabajo a la fuente de poder se denomina cable de trabajo. El cable de trabajo va conectado usualmente a la pieza de trabajo por medio de una pinza, grampa o alguna conexión especial. El cable que conecta la antorcha a la fuente de poder se denomina cable del electrodo y es una parte del ensamblaje de la antorcha. El tamaño del cable usado para soldar depende de la capacidad de salida de la máquina para soldar y de la distancia entre la máquina para soldar y la pieza de trabajo. Los tamaños de los cables varían desde el calibre más pequeño AWG No. 8 hasta el calibre AWG No. 4/0, con amperajes que van desde los 75 A hasta valores mayores.

1.2 Difracción de rayos X

La Figura 1.2.1 muestra una sección de un cristal con sus átomos arreglados como un conjunto de planos paralelos A, B, C, D,..., normal al plano del dibujo y espaciados una distancia d' . Se asume que un haz de rayos x perfectamente paralelo y monocromático de longitud de onda λ incide en el cristal a un ángulo θ , llamado ángulo de Bragg, donde θ es medido entre el haz incidente y los planos cristalinos bajo consideración.

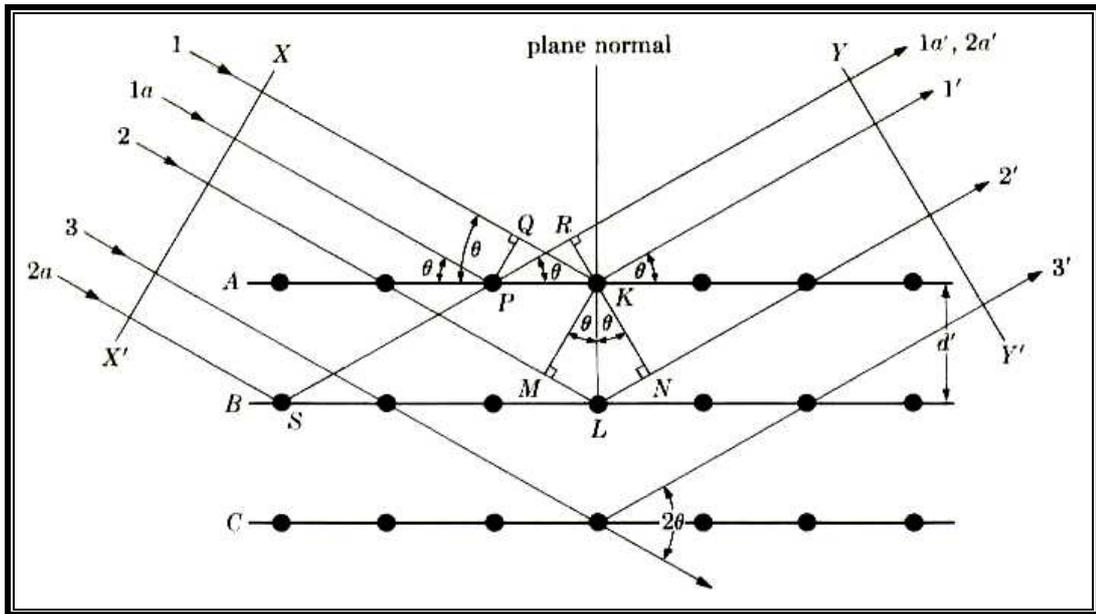


Figura 1.2.1 Esquema que muestra la difracción de rayos x en un cristal.

Deseamos conocer el haz incidente de rayos X que será difractado por el cristal y bajo que condiciones. Un haz difractado puede definirse como un haz compuesto por un gran número de rayos dispersados que se refuerzan mutuamente. La difracción es, por lo tanto, esencialmente un fenómeno de dispersión.

Para las condiciones particulares descritas, el único haz difractado formado es el que se muestra a un ángulo θ , nombrado ángulo θ de reflexión y que es igual al ángulo θ de incidencia. Primero se muestra para un plano de átomos y después para todos los átomos que forman el cristal. Consideremos el rayo 1 y 1a como el haz incidente; estos golpean los átomos K y P en el primer plano de átomos y son dispersados en todas direcciones. Sin embargo, solamente en las direcciones 1' y 1a' los haces dispersados se encuentran en fase y son capaces de reforzarse entre ellos, esto debido a que la diferencia de sus longitudes de trayectoria entre los frentes de onda XX' y YY' es igual a

$$QK - PR = PK \cos \theta - PK \cos \theta = 0.$$

De forma similar, los rayos dispersados por todos los átomos en el primer plano en la dirección paralela a $1'$ están en fase y contribuyen al haz difractado. Esto es cierto para todos los planos por separado y se mantiene para encontrar la condición de reforzamiento de los rayos dispersados por los átomos en diferentes planos. Los rayos 1 y 2, por ejemplo, son dispersados por los átomos K y L, y la diferencia de trayectoria para los rayos $1K1'$ y $2L2'$ es

$$ML + LN = d' \sin \theta + d' \sin \theta$$

Esto también es la diferencia de trayectoria para los rayos dispersados traslapados de S y P en la dirección mostrada, cuando en esta dirección no hay diferencia de trayectoria entre los rayos dispersados de S y L ó de P y K. Los rayos dispersados $1'$ y $2'$ estarán completamente en fase si esta diferencia de trayectoria es igual a número total n de longitudes de onda, o si

$$N\lambda = 2d' \sin \theta$$

Esta es la relación que fue formulada por W. L. Bragg y es conocida como la ley de Bragg. Este estado es condición esencial que debe cumplirse para que ocurra la difracción. n es llamada el orden de reflexión; puede tomar cualquier valor de número entero coherente tal que $\sin \theta$ no exceda la unidad y es igual al número de longitudes de ondas en la diferencia de trayectoria entre los rayos dispersados por los planos adyacentes. Por lo tanto, para valores fijos de λ y d' , existen varios ángulos de incidencia $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots$ en los cuales puede ocurrir difracción, correspondiéndole a $n = 1, 2, 3, \dots$. En una reflexión de primer orden ($n = 1$), los

rayos dispersados $1'$ y $2'$ pueden diferir en longitud de trayectoria (y de fase) en una longitud de onda, los rayos $1'$ y $3'$ en dos longitudes de onda, los rayos $1'$ y $4'$ en tres longitudes de onda y así sucesivamente en todo el cristal. Los rayos dispersados por todos los átomos en todos los planos están por lo tanto completamente en fase y se refuerzan entre ellos para formar un haz difractado en la dirección mostrada. En otras direcciones los haces estarán fuera de fase y se anularán. El haz difractado es más fuerte en comparación a la suma de todos los rayos dispersados en la misma dirección, simplemente por el reforzamiento que ocurre, pero extremadamente débil comparado con el haz incidente cuando en los átomos de un cristal sólo una pequeña fracción de la energía incide en ellos.

En resumen, la difracción es esencialmente un fenómeno de dispersión en el cuál un gran número de átomos cooperan. Cuando los átomos están arreglados periódicamente en una retícula, los rayos dispersados por ellos tienen una relación de fase; estas relaciones de fase pueden ser de interferencia destructiva en muchas direcciones de dispersión, y en pocas de ellas existe interferencia constructiva y por lo tanto se forman haces difractados. Los dos elementos importantes son un movimiento ondulatorio capaz de interferencia (rayos x) y un conjunto de centros de dispersión arreglados periódicamente (los átomos de un cristal).

Hay dos hechos geométricos que vale la pena recordar: 1) El haz incidente, la normal al plano de reflexión y el haz difractado son siempre coplanares. 2) El ángulo entre el haz difractado y el haz transmitido es siempre 2θ . Este es conocido como el ángulo de difracción, y es este ángulo, más que θ , el que se mide experimentalmente.

Como se ha mencionado, la difracción ocurre generalmente cuando la longitud de onda de la onda en movimiento es del mismo orden en magnitud de la distancia entre los centros dispersores. Esto nos lleva a la ley de Bragg. Cuando $\sin \theta$ no excede de la unidad, podemos escribir

$$\frac{n\lambda}{2d'} = \text{sen } \theta < 1$$

Por lo tanto, $n\lambda$ debe ser menor que $2d'$. Por difracción el valor más pequeño para n es 1. ($n = 0$ corresponde al haz difractado en la misma dirección del haz transmitido. No puede ser observado). De esta forma, la condición para la difracción a cualquier ángulo 2θ observable es

$$\lambda < 2d'$$

Para la mayoría de planos cristalinos d' es del orden de 3 \AA o menos, lo cual significa que λ no excede de 6 \AA . Un cristal no podría difractar la radiación ultravioleta, por ejemplo de una longitud de onda de 500 \AA . Por el otro lado, si λ es muy pequeña, los ángulos de difracción son muy pequeños para hacer una medición.

La ley de Bragg puede escribirse en la forma

$$\lambda = 2 \frac{d'}{n} \text{sen } \theta$$

Cuando el coeficiente de λ es unitario, podemos considerar una reflexión de cualquier orden como una reflexión de primer orden para planos, reales o ficticios, espaciados a una distancia $1/n$ del espaciamiento previo. Esto nos lleva a una conveniencia real, de manera que $d = d' / n$ y escribimos la ley de Bragg en la forma

$$\lambda = 2d \text{sen } \theta$$

En un difractómetro, un detector móvil de rayos x registra los ángulos 2θ con los cuales se difracta el haz y se obtiene una Figura característica de difracción. Si se conoce la longitud de onda de los rayos x, se pueden determinar las distancias entre planos y, finalmente, la identidad de los planos que causan la difracción. En un difractómetro de rayos x, estos últimos se producen bombardeando un blanco metálico con un haz de electrones de alta energía. Los rayos x emitidos por el cobre tienen una longitud de onda $\lambda \cong 1.5406 \text{ \AA}$ (línea K- α_1) y por ello se usan.

1.3 Solidificación celular y solidificación dendrítica

Todos los materiales metálicos así como gran cantidad de cerámicos, vidrios inorgánicos y polímeros termoplásticos, son líquidos o están fundidos en algún momento durante su procesamiento. Durante la solidificación de los materiales que cristalizan, el arreglo atómico de los materiales cristalizados cambia de un orden de corto alcance a uno de largo alcance.

La solidificación de los materiales cristalinos se realiza en dos etapas: en la primera, se forman en el líquido pequeños cristales ultrafinos llamados núcleos de la fase sólida; en la segunda, que puede traslaparse con la primera, los pequeños cristales sólidos ultrafinos comienzan a crecer a medida que los átomos en el líquido se adhieren a los núcleos hasta que ya no queda líquido.

Durante la formación del sólido se crea una interfase plana sólido-líquido; sin embargo, se puede tornar inestable debido a la aparición de una fuerza impulsora para inestabilidad del frente plano (Figura 1.3.1). Una capa rica en soluto está presente en el frente de una interfase creciendo, en la cual la composición del líquido C_L^* es máxima en la interfase y se reduce con la distancia. Con la ayuda del diagrama de fases (Figura 1.3.1a) se dibuja la temperatura de equilibrio de liquidus en función de la distancia desde la interfase como se observa en las Figuras 1.3.1c y

1.3.1d. La temperatura de equilibrio de liquidus se eleva debido a un bajo contenido de soluto. A continuación, la temperatura del cristal creciendo se coloca en la misma gráfica. Cuando existe equilibrio en la interfase, esta curva debe pasar a través de T^* en la interfase $x'=0$ y su forma es dictada por el flujo de calor.

La curva en la Figura 1.3.1c muestra la condición donde la interfase está exactamente en la temperatura de equilibrio de liquidus y donde cada punto en el frente de la interfase se encuentra a la temperatura sobre el liquidus. Esto representa la condición necesaria para la solidificación de frente plano estable. Si una inestabilidad causa una protuberancia que se forme en la interfase plana, esta se encontrará en un ambiente sobrecalentado y se fundirá.

En la Figura 1.3.1d, por otro lado, se presenta un caso inestable; aquí, el líquido se encuentra debajo de la temperatura de equilibrio de liquidus, y está, por lo tanto, sobre enfriado. A esto se le llama sobreenfriamiento constitucional. De acuerdo a esta teoría, este sobreenfriamiento provoca inestabilidad en el frente plano, de manera que cualquier protuberancia que se forme en la interfase se encuentra en el líquido sobre enfriado y de esta forma podría no desaparecer. Un tratamiento cuantitativo se da a continuación.

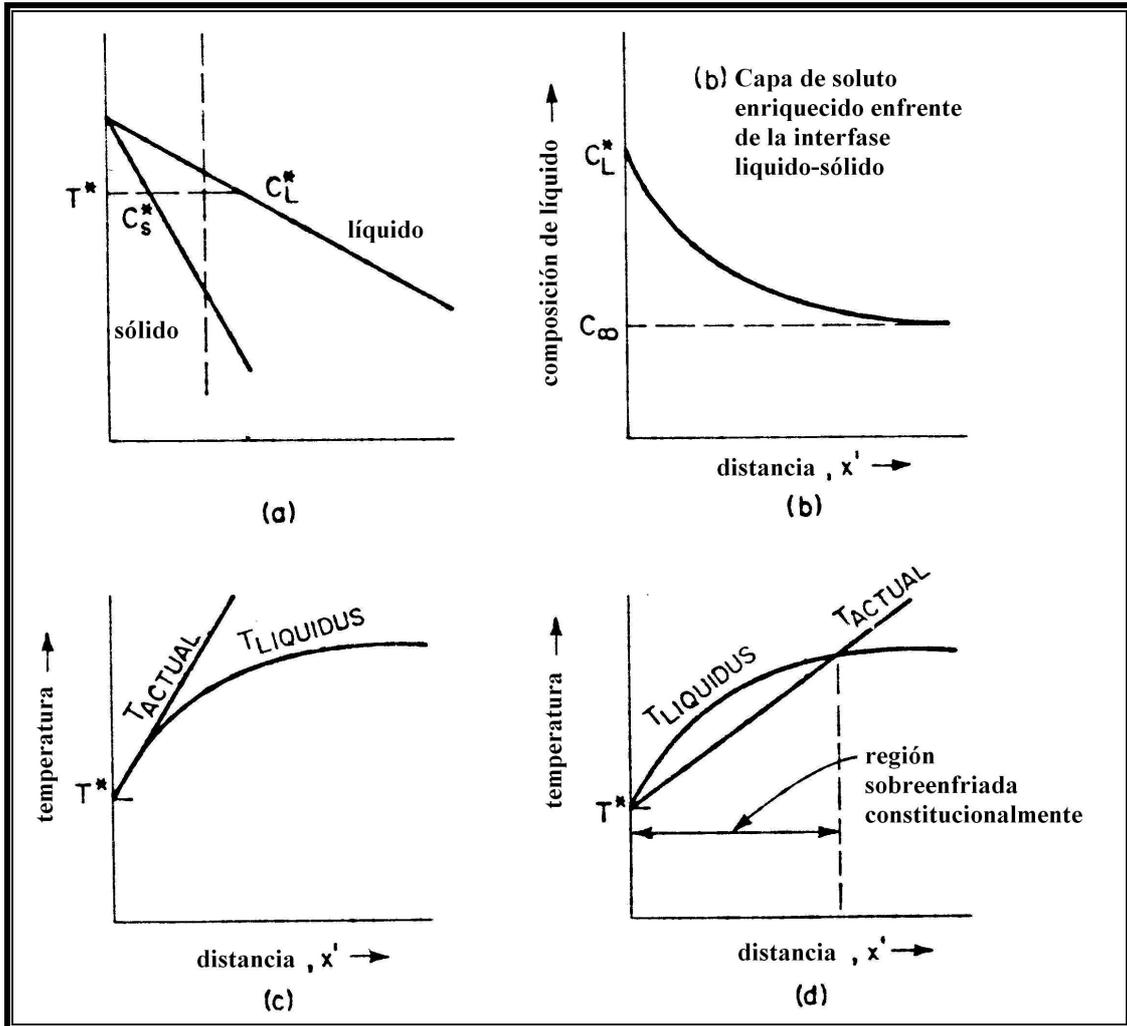


Figura 1.3.1 Sobreenfriamiento constitucional en la solidificación. (a) Sección del diagrama de fases; (b) Capa de soluto enriquecido enfrente de la interfase liquido-sólido; (c) Interfase estable; (d) Interfase inestable.

Para desarrollar cuantitativamente el criterio de sobreenfriamiento constitucional necesitamos considerar solamente el calor y el flujo de masa en la interfase. El gradiente de soluto en el líquido en la interfase está dado por

$$\left(\frac{dC_L}{dx'} \right)_{x'=0} = -\frac{R}{D_L} C_L^* (1-k) \quad (1)$$

Donde R es la rapidez de avance de la interfase, D_L es el coeficiente de difusión de soluto en el líquido, k es la razón de partición de equilibrio ($k = \frac{C_s^*}{C_L}$).

Asumiendo equilibrio en la interfase plana, la pendiente de la curva de la temperatura de equilibrio de liquidus T_L contra la distancia desde la interfase x' , está relacionada a la composición del líquido C_L y la pendiente de la línea de liquidus m_L :

$$\left(\frac{dT_L}{dx'}\right)_{x'=0} = m_L \left(\frac{dC_L}{dx'}\right)_{x'=0} \quad (2)$$

El sobreenfriamiento constitucional es nulo cuando el gradiente actual de temperatura en el líquido en la interfase G_L es igual o mayor que $(dT_L/dx')_{x'=0}$. Combinando esta última ecuación con las ecuaciones (1) y (2) y dejando que $C_s^* = kC_L^*$ nos da el criterio de sobreenfriamiento constitucional. Esto es, un frente plano es estable cuando

$$\frac{G_L}{R} \geq -\frac{m_L C_s^* (1-k)}{k D_L} \quad (3)$$

La ecuación (3) es aplicable a pesar de la presencia o falta de convección, puesto que una capa laminar existe enfrente de la interfase solidificando sin tener en cuenta el grado de convección. C_s^* está dado por la relación

$$\frac{C_L - C_s^*}{C_0 - C_s^*} = e^{-\frac{R\delta}{D_L}} \quad (4)$$

Donde δ es el espesor de la capa laminar, C_0 es la composición inicial. En estado estable, sin convección, $C_s^* = C_0$ y la ecuación 3 se transforma en el criterio de sobreenfriamiento constitucional originalmente obtenido por Chalmers y colaboradores:

$$\frac{G_L}{R} \geq -\frac{m_L C_0 (1-k)}{kD_L} \quad (5)$$

Cuando la convección es lo suficientemente vigorosa que, desde un punto de vista de redistribución del soluto, la difusión en el líquido es completa, aún existe una capa laminar y su pequeño pero finito gradiente de concentración. En este caso,

$$\frac{G_L}{R} \geq -\frac{m_L C_\infty (1-k)}{kD_L} \quad (6)$$

donde C_∞ es la composición de la masa líquida, y es igual a C_0 para una pequeña cantidad solidificada de una gran masa fundida.

Experimentos en líquidos orgánicos transparentes muestran como una interfase plana que se vuelve inestable, primeramente se convierte ondulatoria con salientes que se desarrollan en formas llamadas células, tal como se muestra en la Figura 1.3.2. Si un límite de grano está presente, los surcos asociados con esos límites actúan como distorsiones empotradas en el plano frontal y el rompimiento de la interfase comienza aquí, propagándose exteriormente a otras porciones del cristal.

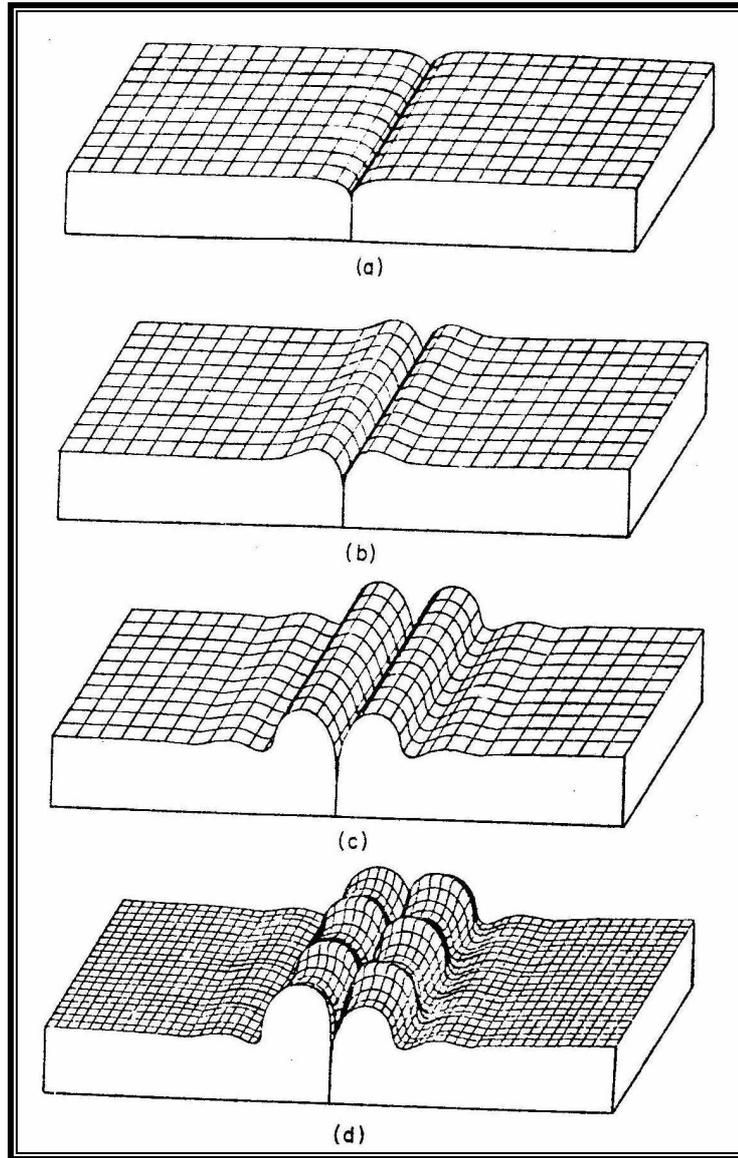


Figura 1.3.2 Modos de rompimiento de interfase planar cerca de un límite de grano. (a) Límite de grano produce un surco en la interfase en equilibrio; (b) Cuando se inicia el crecimiento, las regiones adyacentes al límite de grano crecen más rápidamente y forman crestas paralelas; (c) A medida que las crestas se alargan, crestas secundarias aparecen junto a ellas; (d) Las crestas primarias se rompen en filas periódicas de colinas.

Cuando las células se forman y crecen a una proporción baja relativamente, éstas crecen perpendiculares a la interfase liquido-sólido a pesar de la orientación del cristal. Cuando se incrementa la tasa de crecimiento, los efectos cristalográficos empiezan a ejercer influencia y la dirección de crecimiento de la célula se desvía hacia la dirección de crecimiento cristalográfica preferida (por ejemplo $\langle 100 \rangle$ para metales cúbicos); simultáneamente, la sección transversal de la célula generalmente empieza a desviarse de su geometría circular previa debido a los efectos de la cristalografía. Esta estructura ha sido descrita como estructura rebordeada o *cruz de malta* en materiales cúbicos. Cuando el índice de crecimiento se incrementa aún más, la estructura en forma de cruz se vuelve más aparente y empieza a aparecer el borde dentado en los rebordes de la cruz, esto es, los brazos secundarios de la dendrita son claramente observables (Figura 1.3.3).

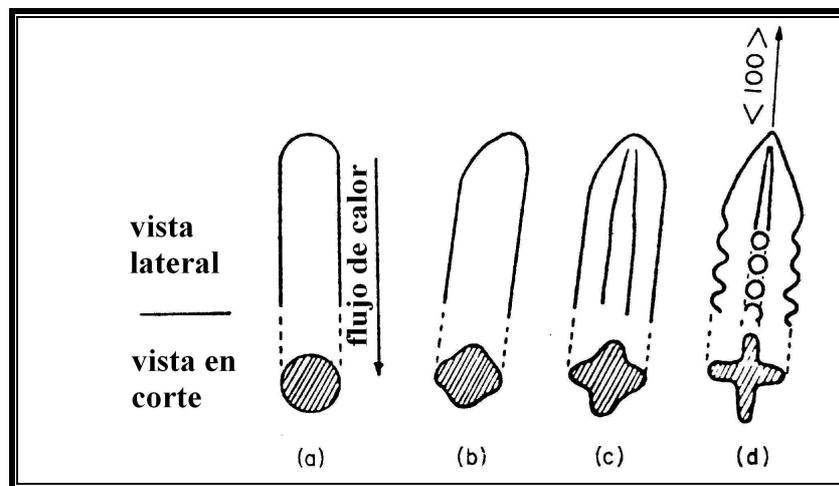


Figura 1.3.3 Esquema del cambio de forma en el crecimiento de la estructura conforme aumenta la velocidad de crecimiento
a) Crecimiento de célula a baja velocidad; b) Crecimiento de célula en la dirección $\langle 100 \rangle$; c) Célula con reborde; d) Dendrita mostrando el inicio de ramificaciones laterales periódicas.

CAPÍTULO 2

Experimentación

2.1 Material

Placas de la aleación Zn-22Al-2Cu, de 30 mm de ancho y 6.5 mm de espesor, se obtuvieron previamente por el proceso de laminado. Posteriormente, pequeños tramos de 40 mm de largo fueron extraídos de las placas recién laminadas. El corte de las placas se realizó con la ayuda de un disco de carburo de silicio refrigerado con agua.

2.2 Proceso de soldadura

El diseño de la junta de soldadura para la Soldadura al Arco con electrodo de Tungsteno y protección Gaseosa (SATG) se determina por el diseño de la ensambladura, consideraciones metalúrgicas y por códigos o especificaciones. En este caso, se realizó la soldadura a tope con ranura cuadrada (Figura 2.2.1).

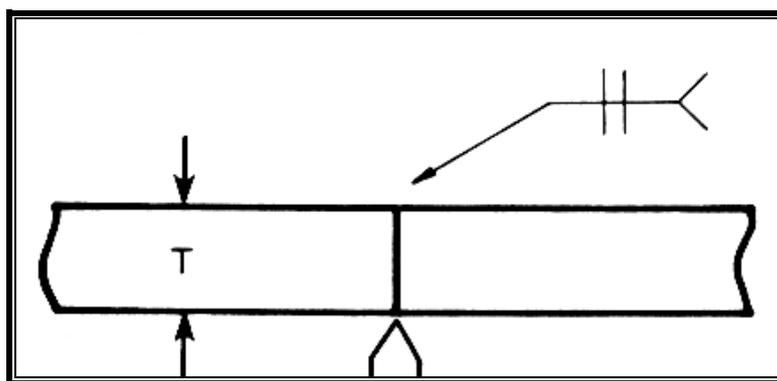


Figura 2.2.1 Designación de junta a tope de ranura cuadrada.

Las **variables fijas o preseleccionadas** fueron establecidas antes de realizar la soldadura. Entre estas variables se tiene el tipo y el tamaño del electrodo, el tipo de corriente, el tipo y flujo del gas para protección y el ángulo de ahusamiento del electrodo. Los valores de estas variables se encuentran en la tabla 2.2.1.

Espesor de la placa (mm)	6.5
Número de pasadas	1
Tipo de electrodo	Tungsteno puro
Tamaño del Tungsteno (mm)	2.38
Tamaño de la Tobera (mm)	7.9
Tipo de Gas	Argón puro
Flujo del Gas (l/min)	9.4
Tipo de corriente	Alterna
Tipo de punta del electrodo	hemisférico

Tabla 2.2.1 Variables fijas empleadas en la soldadura al arco con electrodo de tungsteno y protección gaseosa.

Las **variables primarias ajustables** se usaron para controlar el proceso de soldadura. Éstas controlaron la formación del cordón de soldadura, influyendo en el ancho y altura del cordón, en la penetración de la junta, en la estabilidad del arco y en el acabado de la soldadura. Las variables primarias ajustables para la SATG son la corriente de soldadura, la longitud del arco y la velocidad de avance (Tabla 2.2.2).

Corriente de soldadura (A)	73, 75, 76, 80, 81
Longitud del arco (mm)	~ 3
Velocidad de avance (mm/s)	4

Tabla 2.2.2 Variables primarias ajustables empleadas en la soldadura al arco con electrodo de tungsteno y protección gaseosa.

Las **variables secundarias ajustables** son usualmente más difíciles de medir, y sus efectos pueden no ser tan obvios. Entre las variables secundarias ajustables de la SATG se tuvo el ángulo de la pieza de trabajo y de avance del electrodo, así como la extensión del electrodo (Tabla 2.2.3).

Angulo de la pieza de trabajo y de avance del electrodo (°)	75
Extensión del electrodo (mm)	5

Tabla 2.2.3 Variables secundarias ajustables empleadas en la soldadura al arco con electrodo de tungsteno y protección gaseosa.

Debido a que las soldaduras realizadas mediante este proceso son muy susceptibles de contaminarse durante el proceso de soldadura, la superficie del metal base debe estar perfectamente limpia. En nuestro caso se limpió con estopa para eliminar la grasa, aceite, suciedad, y otros materiales extraños. La soldadura se hizo inmediatamente después de la limpieza.

Se utilizó el tipo de punta hemisférico. Para obtener esta forma de la punta se siguió el siguiente procedimiento: El electrodo a utilizar se afiló de forma puntiaguda y su longitud no fue mayor a 2.5 veces el diámetro del electrodo; posteriormente, se produjo un arco entre el electrodo y una pieza de un metal de desecho con un nivel de corriente moderado, en nuestro caso se situó entre 60 y 80 Amperios, hasta que la bola hemisférica se formó en la punta del electrodo. La superficie de la punta hemisférica se mantuvo perfectamente limpia, brillante y sumamente reflexiva (Figura 2.2.2).

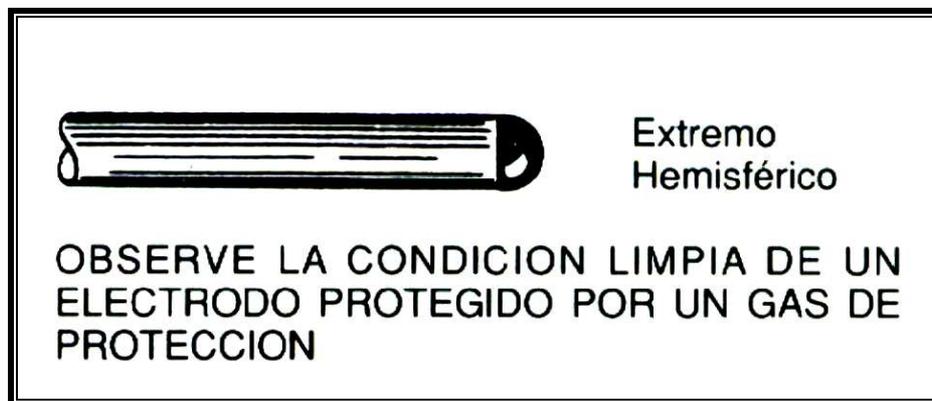


Figura 2.2.2 Forma y condición de la punta del electrodo.

El equipo que se utilizó para la realización de la soldadura fue una máquina marca “Miller” modelo “Syncrowave 180 SD”, para procesos de soldadura por arco con electrodo de tungsteno revestido y gas (Figura 2.2.3).



Figura 2.2.3 Equipo de soldadura al arco con electrodo de tungsteno y protección gaseosa.

El procedimiento para soldar fue el siguiente: Se conectó el cable del electrodo, el cable de trabajo y el control de pedal en sus respectivas terminales. Se abrió la válvula del tanque de gas inerte (argón puro) y por medio del manómetro se ajustó la presión de trabajo (9.4 l/min). Se encendió la máquina y se colocó el “Interruptor Selector de Energía” en “corriente alterna” (AC). Se giró la perilla de “Control de Ajuste de Amperaje” para colocar la corriente establecida para hacer

las pruebas. A continuación se ajustó el control “AC Balance/DIG” para controlar tanto la penetración como la limpieza en las muestras; en nuestro caso elegimos el valor de 7. Se pisó el pedal para observar si había flujo de gas, después de comprobar se pudo realizar la soldadura.

Para realizar la soldadura se debe hacer uso de todo el equipo de protección necesario como guantes, peto, careta de soldador, brazos y polainas, además de una mascarilla contra gases. El uso de la mascarilla de gas es muy importante en esta soldadura, ya que los humos de zinc constituyen un riesgo potencial para la salud, por lo que deben tomarse precauciones con respecto a la ventilación. Se puede presentar fiebre o calentura por humos metálicos conocida como “escalofríos del zinc”. Los escalofríos son producidos por el óxido de zinc coloidal al penetrar a los pulmones.

La forma en que se hizo la soldadura se puede observar en las Figuras 2.2.4 y 2.2.5.

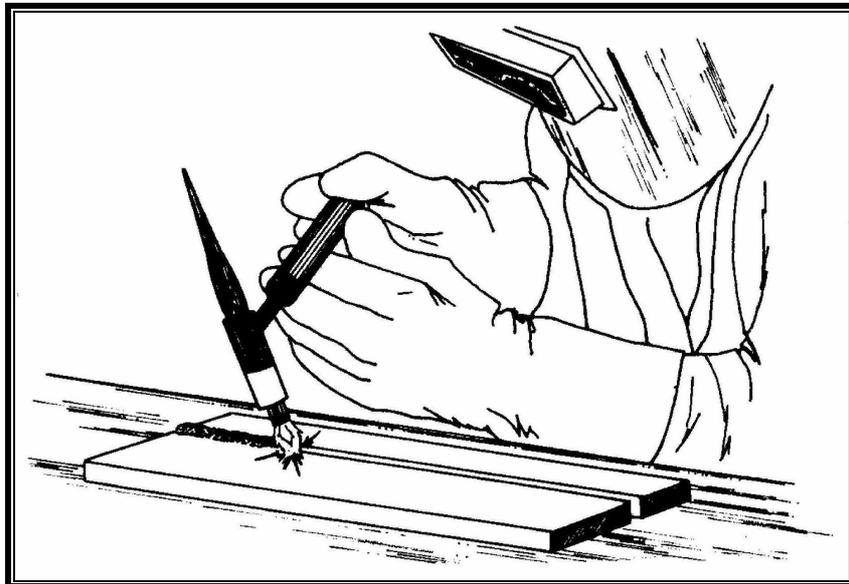


Fig. 2.2.4 Forma de hacer la soldadura.

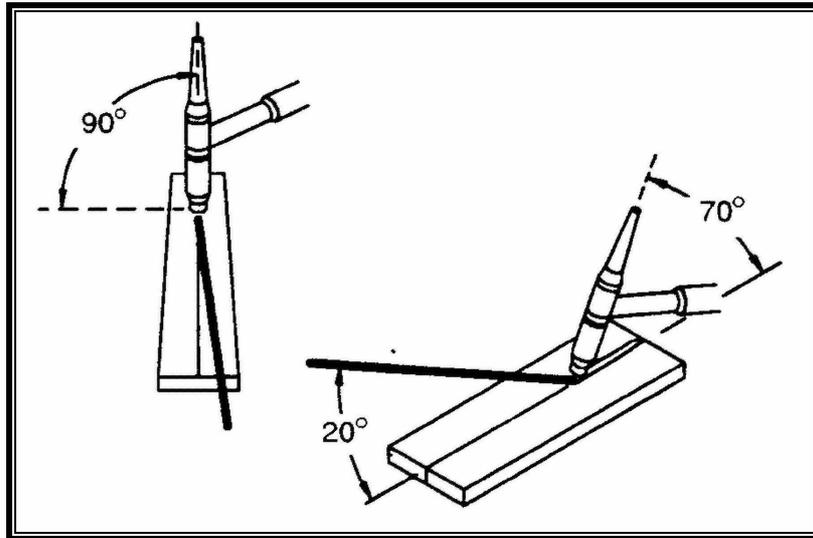


Figura 2.2.5 Inclinación de la antorcha para hacer la soldadura.

2.3 Preparación de la sección transversal del cordón de soldadura para su observación al microscopio óptico

Una vez soldadas todas las parejas de placas, se efectuaron cortes transversales al cordón de soldadura en tres puntos diferentes, esto con objeto de comparar la penetración y el ancho de la zona de fusión a lo largo del mismo. Para ello se utilizó un disco de carburo de silicio refrigerado con agua.

Para poder observar al microscopio la penetración y el ancho de la zona de fusión, se procedió a realizar un pulido mecánico a la cara seleccionada (la más representativa). Se utilizaron lijas de los números 320, 400, 500 y 600, y se comenzó por la más gruesa (320). La superficie a desbastar se rotó 90 grados cada vez que se cambió de lija para que el siguiente rayado quedara perpendicular al anterior, se repitió esto con cada cambio de lija conforme se fue avanzando hacia la más fina. Una vez que las superficies estuvieron planas y lisas, se continuó con el pulido especular. Este se llevó a cabo con una pulidora de disco modelo “Ecomet I” de la marca “Buelher”. El procedimiento se describe a continuación. A la superficie

alisada mediante desbaste se le colocó sobre el plato giratorio, cubierto previamente con un paño de lana húmedo, y se le sostuvo manualmente aplicando una ligera presión. Una solución de agua con alúmina se agregó sobre el paño mediante goteo. Se empleó alúmina con un tamaño de partícula de $5\mu\text{m}$ para preparar la solución acuosa.

El último paso en la preparación de las superficies para su observación al microscopio, fue el ataque químico. Este consistió en sumergir la superficie pulida a espejo en una solución de 200 g de CrO_3 + 15 g de Na_2SO_4 en un litro de H_2O por 3 minutos, e inmediatamente enjuague en una solución de 200 g de CrO_3 en un litro de H_2O . Enseguida, se lavaron las superficies atacadas en chorro de agua, se sumergieron en metanol y finalmente se secaron con chorro de aire.

La observación de la sección del cordón de soldadura se hizo en un microscopio estereográfico con una amplificación de 12X. Una cámara fotográfica marca “Canon” modelo “AE-1” se acopló al microscopio. Para tener una iluminación adecuada se utilizaron dos focos “Photoflood” marca “General Electric” de 100 watts cada uno. Las imágenes se grabaron en película “Kodak ectachrome” con ASA 400. El montaje se puede observar en la Figura 2.3.1.



Figura 2.3.1 Montaje para la obtención de la macrografía de la sección transversal del cordón de soldadura.

2.4 Preparación de la sección transversal del cordón de soldadura para su irradiación con rayos X

Tomando en cuenta la capacidad, en cuanto a tamaño (30 mm), del portamuestra del difractómetro de rayos X, hubo de eliminarse, mediante corte, parte del material base a ambos lados de la sección transversal del cordón de soldadura; reiterando, que el corte se efectuó con disco abrasivo y refrigerante para no afectar la estructura cristalina. Una vez satisfecha esta condición dimensional, se procedió a su colocación en el portamuestra del equipo y a la obtención de los patrones de difracción respectivos.

El equipo empleado para la obtención de los patrones de difracción fue un difractómetro de rayos X marca “Siemens” modelo “D-5000”. Se utilizó la radiación $K\alpha$ de cobre, con una longitud de onda $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$. La rapidez de barrido fue de 0.1 grados por minuto (0.1°/min) y el ángulo de barrido 2θ se prefijó entre 35° y 46°.

2.5 Preparación de la sección transversal del cordón de soldadura para su observación al microscopio electrónico de barrido y microanálisis

El portamuestra del microscopio electrónico de barrido también presentó la limitante de tamaño (30 mm), como en el caso anterior; por lo que las muestras empleadas anteriormente también se usaron aquí, pero con la siguiente modificación. Cada una de las muestras fue embutida en resina, formando en conjunto un cilindro de material compuesto de 30 mm de diámetro, de manera que la sección transversal del cordón de soldadura quedó expuesta en una de las bases del cilindro. Tomando en cuenta la manipulación de la muestra al embutirla, hubo de realizarse nuevamente el pulido a espejo de la sección transversal del cordón de soldadura. Posteriormente, la superficie lateral del cilindro de resina se cubrió con papel de aluminio. Finalmente, se estableció una conexión eléctrica entre la superficie metálica a observar y el papel de aluminio empleando pintura de plata; esto con la finalidad de evitar que la superficie metálica se cargue con los electrones procedentes del cañón y afecte la imagen. Una vez realizado el montaje, se procedió a la colocación del conjunto en el portamuestra y a la introducción en la cámara al vacío del microscopio.

La observación de la estructura de la sección transversal del cordón de soldadura, se realizó con la ayuda de un Microscopio Electrónico de Barrido modelo “JSM-6060LV”, utilizando electrones retrodispersos. Las ampliaciones de imagen empleadas fueron de 250X y 1000X.

La determinación puntual de elementos, mediante microanálisis, se llevó a cabo con la ayuda de un equipo de espectroscopia de Emisión de Energía (EDS) Oxford Inca X – Sight con un detector tipo WAFER de silicio dopado con litio acoplado al Microscopio Electrónico de Barrido.

CAPÍTULO 3

Resultados y discusión

3.1 Macrografías

En el Capítulo anterior se mencionó que a cada pareja soldada se le practicaron 3 cortes perpendiculares a los cordones de soldadura, dichos cortes se maquinaron equidistantes a fin de poder observar variaciones en la profundidad y en el ancho de la Pileta de Fusión a lo largo de los cordones; sin embargo, no se detectaron cambios notorios de los parámetros mencionados, salvo al principio y al final del proceso como era de esperarse. Por lo tanto, se consideró como imagen representativa de la sección transversal de cada cordón a la obtenida a la mitad de la trayectoria de los cordones, ya que es en este punto donde el proceso alcanza condiciones de operación estables.

Las Figuras 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3, 3.1.4 y 3.1.5 muestran las imágenes de la sección transversal de los cordones de soldadura y parte del metal base. El contraste de color empleado permite distinguir las zonas de la soldadura. Así mismo, la escala en la parte inferior sirve de referencia para determinar, por comparación, la extensión de cada una de dichas zonas. Cabe señalar que para efecto de una medición más precisa de la Pileta de Fusión y de la Zona Afectada por el Calor se utilizó un “programa de computadora” para imágenes, con el cual se pudo resaltar y medir posteriormente cada una de las zonas. Como podrá notarse, cada una de las imágenes muestra peculiaridades que son el resultado de la corriente eléctrica empleada en cada pareja soldada, principalmente. A continuación se muestran las macrografías correspondientes y en la parte inferior la descripción del contenido de cada una de éstas.

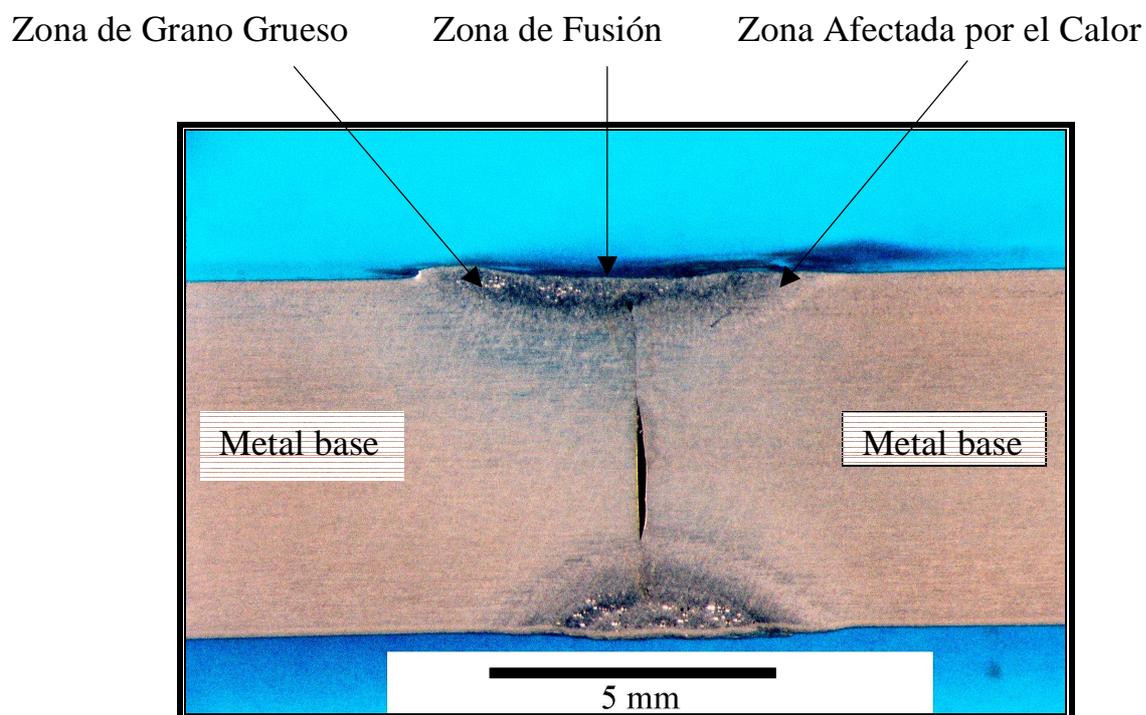


Figura 3.1.1 Macrografía mostrando la sección transversal de los cordones de la soldadura SATG entre placas de la aleación Zn-22Al-2Cu (% peso) de 6.5 mm de espesor. La soldadura se realizó empleando una corriente de 73 Amperios.

En la imagen de la Figura anterior las zonas oscuras en forma de segmentos circulares con diminutos puntos brillantes corresponden a las zonas de fusión. Las franjas envolventes a cada zona de fusión, de tonalidad grisácea, son zonas formadas de grano grueso y marcan el inicio de la zona afectada por el calor. En esta misma imagen también puede notarse una oquedad alargada colocada en posición vertical; dicha oquedad es un defecto de la unión mecánica entre las placas que estuvo presente desde el inicio. A partir del extremo superior de la oquedad una línea se extiende hasta el borde inferior de la zona de fusión; dicha

línea marca la unión mecánica inicial entre ambas placas. Los valores de penetración y ancho de la zona de fusión para las soldaduras superior e inferior se muestran en la Tabla 3.1.1

	Penetración (mm)	Ancho de la zona de fusión (mm)	Zona afectada por el calor (mm)
Soldadura superior	1	6.4	1 - 1.4
Soldadura inferior	1.3	4.9	0.8 - 1.2

Tabla 3.1.1 Valores de penetración, ancho de zona de fusión y zona afectada por el calor para la soldadura SATG entre placas de la aleación Zn-22Al-2Cu (% peso) de 6.5 mm de espesor. La soldadura se realizó empleando una corriente de 73 Amperios.

Si se considera el área de la sección transversal final entre las placas (espesor final x ancho de placa) en el punto de unión, el área soldada efectiva (*ASE*) es aquella parte del área de la sección transversal final que queda dentro de la zona de fusión, de esta manera

$$ASE = (P_s + P_i)l$$

Donde, P_s es la penetración de la soldadura superior, P_i es la penetración de la soldadura inferior y l es la longitud del cordón de soldadura. Luego, para este caso, $ASE = (1 \text{ mm} + 1.3 \text{ mm}) (30 \text{ mm}) = 69 \text{ mm}^2$. Este valor representa aproximadamente el 35 % del área de la sección transversal final que es de 195 mm^2 , con lo cual se calificaría esta soldadura como de corta penetración.

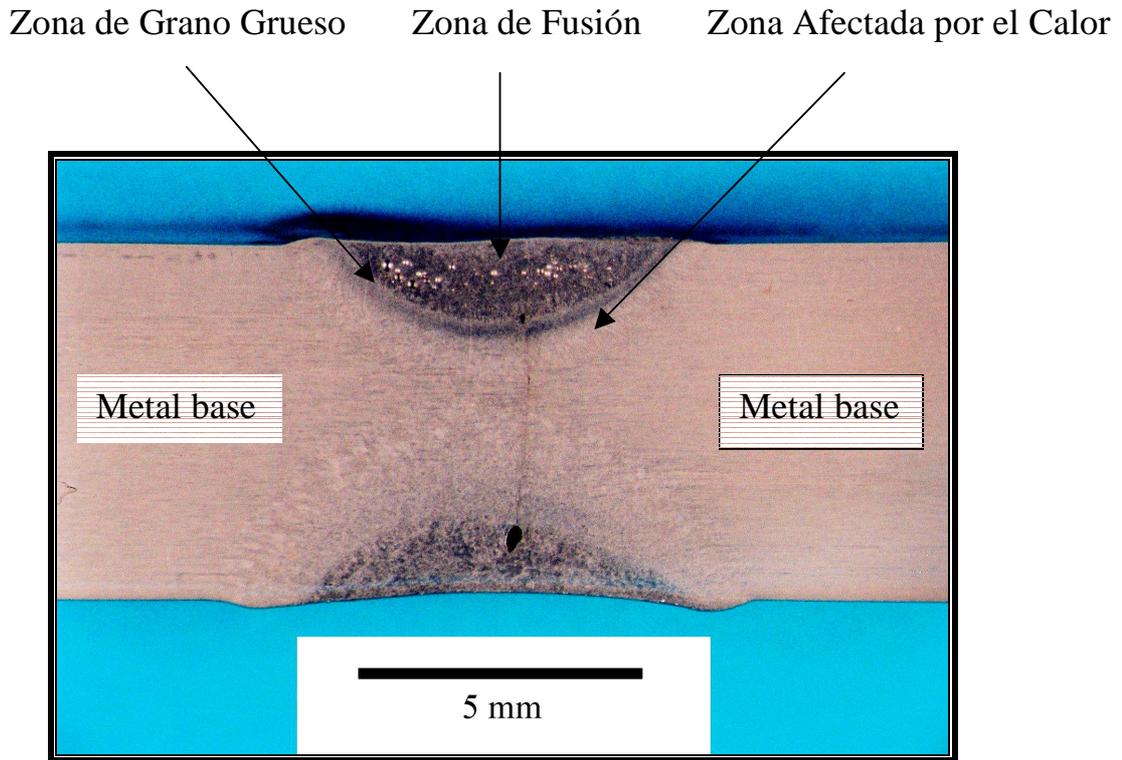


Figura 3.1.2 Macrografía mostrando la sección transversal de los cordones de la soldadura SATG entre placas de la aleación Zn-22Al-2Cu (% peso) de 6.5 mm de espesor. La soldadura se realizó empleando una corriente de 75 Amperios.

La Figura 3.1.2 muestra la sección transversal de los cordones de la soldadura SATG de una muestra del grupo de placas soldadas empleando una corriente de 75 Amperios. En esta imagen las zonas pueden observarse más claramente así como los bordes delimitando la zona de fusión. El ancho de la franja ocupada por granos grueso es más evidente en la soldadura superior y a simple vista pueden notarse las extensiones de las zonas afectadas por el calor. Para completar la descripción de la imagen, puede verse una línea vertical muy fina entre las dos zonas de fusión con un poro en cada extremo. Esta línea marca la

unión mecánica inicial del acoplamiento. Los valores de penetración y ancho de la zona de fusión para las soldaduras superior e inferior se muestran en la Tabla 3.1.2.

	Penetración (mm)	Ancho de la zona de fusión (mm)	Zona afectada por el calor (mm)
Soldadura superior	1.3	5.3	1.1 - 1.3
Soldadura inferior	1.2	6.9	1.5 - 2

Tabla 3.1.2 Valores de penetración, ancho de zona de fusión y zona afectada por el calor para la soldadura SATG entre placas de la aleación Zn-22Al-2Cu (% peso) de 6.5 mm de espesor. La soldadura se realizó empleando una corriente de 75 Amperios.

Para este caso, $ASE = (1.5 \text{ mm} + 1.4 \text{ mm}) (30 \text{ mm}) = 87 \text{ mm}^2$. Este valor representa aproximadamente el 44 % del área de la sección transversal final, con lo cual se calificaría esta soldadura como de corta penetración también.

Por otro lado, la arista de la soldadura superior está desplazada respecto a la arista del metal base; este desplazamiento es el resultado del crecimiento de los granos en la zona de afectada por el calor. En la soldadura inferior también pueden observarse abultamientos en los extremos de la zona de fusión cuyo origen es el mismo, pero aquí la arista de la zona de fusión es ligeramente cóncava debido a que el ancho de dicha zona es mayor.

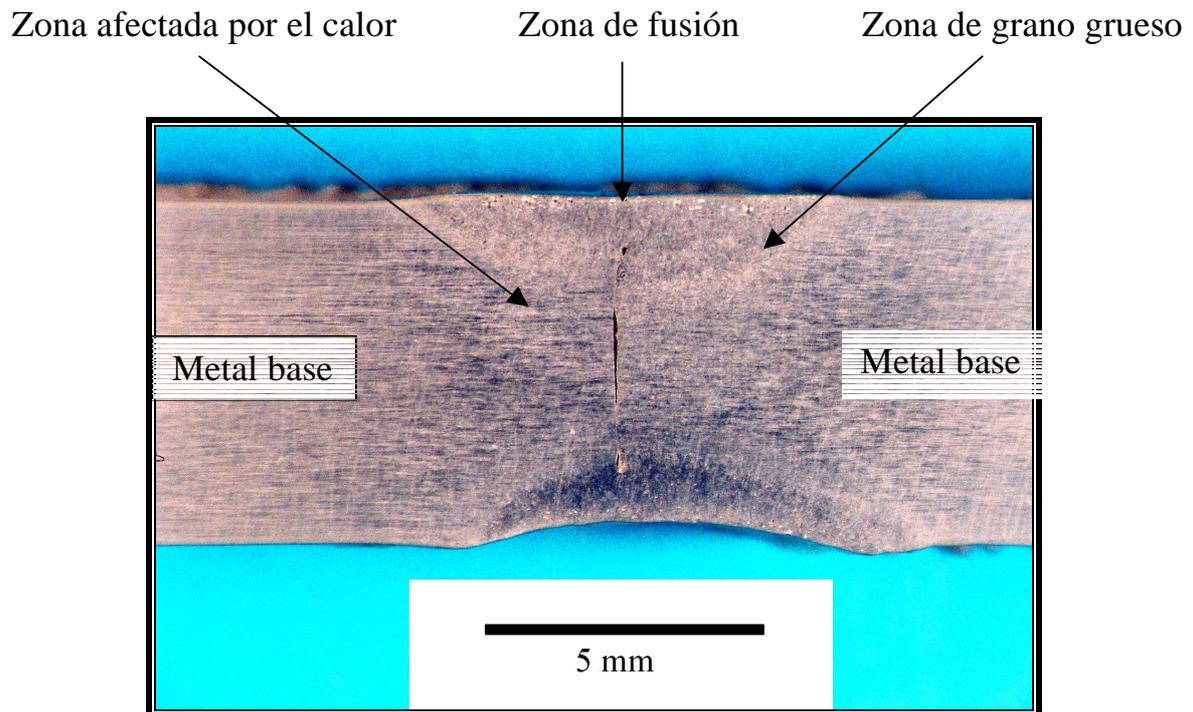


Figura 3.1.3 Macrografía mostrando la sección transversal de los cordones de la soldadura SATG entre placas de la aleación Zn-22Al-2Cu (% peso) de 6.5 mm de espesor. La soldadura se realizó empleando una corriente de 76 Amperios.

La imagen de la Figura 3.1.3 muestra el aspecto de los cordones de la soldadura SATG realizadas entre placas de 6.5 mm de espesor, de la aleación mencionada, empleando una corriente de 76 Amperios. La imagen no es tan clara como la anterior pero pueden observarse los segmentos circulares de las zonas de fusión. En este caso, como es de esperarse, la penetración y el ancho de las zonas son mayores que en todos los casos anteriores. La arista de la zona de fusión inferior muestra una concavidad mayor que en el caso anterior. Así mismo, la línea que demarca la unión mecánica inicial puede ser vista. El aspecto oscuro de la zona afectada por el calor es debido a la presencia de óxidos al momento de realizar la

toma. Los valores de penetración y ancho de la zona de fusión para las soldaduras superior e inferior se muestran en la Tabla 3.1.3.

	Penetración (mm)	Ancho de la zona de fusión (mm)	Zona afectada por el calor (mm)
Soldadura superior	1.7	7.8	2.4 – 2.8
Soldadura inferior	1.3	8.3	1 – 3

Tabla 3.1.3 Valores de penetración, ancho de zona de fusión y zona afectada por el calor para la soldadura SATG entre placas de la aleación Zn-22Al-2Cu (% peso) de 6.5 mm de espesor. La soldadura se realizó empleando una corriente de 76 Amperios.

Para este caso, $ASE = (1.7 \text{ mm} + 1.3 \text{ mm}) (30 \text{ mm}) = 90 \text{ mm}^2$. Este valor representa aproximadamente el 50 % del área de la sección transversal final, con lo cual se calificaría esta soldadura como de mediana penetración.

Para este nivel de corriente eléctrica sigue siendo notoria la diferencia entre la forma y dimensiones de las soldaduras superior e inferior. Por lo que queda demostrado que la presencia de la primera soldadura afecta la forma y dimensiones de la soldadura final. Es decir, cuando se aplica la primera soldadura la estructura que se tiene es únicamente la del metal base, dicha estructura puede considerarse homogénea y de composición uniforme; al aplicar la segunda soldadura, los cambios de: estructura granular; composición química; conductividad térmica; temperatura de fusión, causados por la primera, afectan el entorno de la última y producen modificaciones como las observadas.

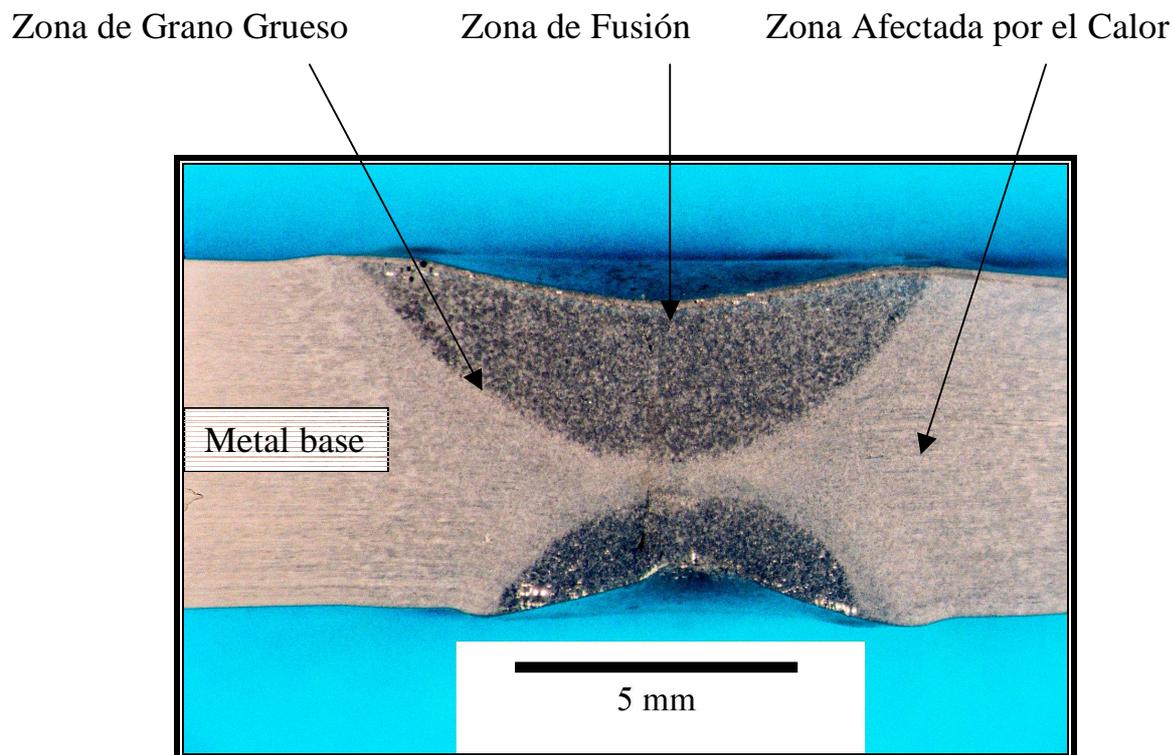


Figura 3.1.4 Macrografía mostrando la sección transversal de los cordones de la soldadura SATG entre placas de la aleación Zn-22Al-2Cu (% peso) de 6.5 mm de espesor. La soldadura se realizó empleando una corriente de 80 Amperios.

La imagen de la Figura 3.1.4 muestra la sección transversal de los cordones de la soldadura SATG empleando una corriente de 80 Amperios. En esta imagen se observan claramente los segmentos circulares de las zonas de fusión. También, a la izquierda de las zonas de fusión puede notarse la extensión de la zona afectada por el calor. Por otra parte, las aristas de las zonas de fusión presentan una pronunciada concavidad. Dicha concavidad puede ser el resultado del intenso impacto de electrones provenientes del electrodo al formarse la pileta líquida, pues el flujo de gas en todos los casos se mantuvo constante. Adicionalmente, se tuvo una pérdida en la alineación de las placas, pues el ancho de la zona de fusión superior rebasó el

espesor de las placas. Los valores de penetración y ancho de la zona de fusión para las soldaduras superior e inferior empleando 80 Amperios se muestran en la Tabla 3.1.4.

	Penetración (mm)	Ancho de la zona de fusión (mm)	Zona afectada por el calor (mm)
Soldadura superior	2.8	10.3	1.5 – 2.3
Soldadura inferior	1.4	6.5	3.1 – 3.7

Tabla 3.1.4 Valores de penetración, ancho de zona de fusión y zona afectada por el calor para la soldadura SATG entre placas de la aleación Zn-22Al-2Cu (% peso) de 6.5 mm de espesor. La soldadura se realizó empleando una corriente de 80 Amperios.

Para este caso, $ASE = (2.8 \text{ mm} + 1.4 \text{ mm}) (30 \text{ mm}) = 126 \text{ mm}^2$. Este valor representa aproximadamente el 82 % del área de la sección transversal final, con lo cual se calificaría esta soldadura como de alta penetración.

En la macrografía de la Figura 3.4 también pueden observarse abultamientos de material en los extremos de las aristas de la zona de fusión. Como ya se mencionó, dichos abultamientos son producidos por el crecimiento de grano en la zona contigua. Aunque la unión por soldadura de las placas se realizó casi por completo, el estrechamiento de la zona soldada puede tener repercusiones negativas en cuanto a las propiedades mecánicas, pues en dicho estrangulamiento habría una concentración de esfuerzos.

Zona de Grano Grueso Zona de fusión Zona afectada por el calor

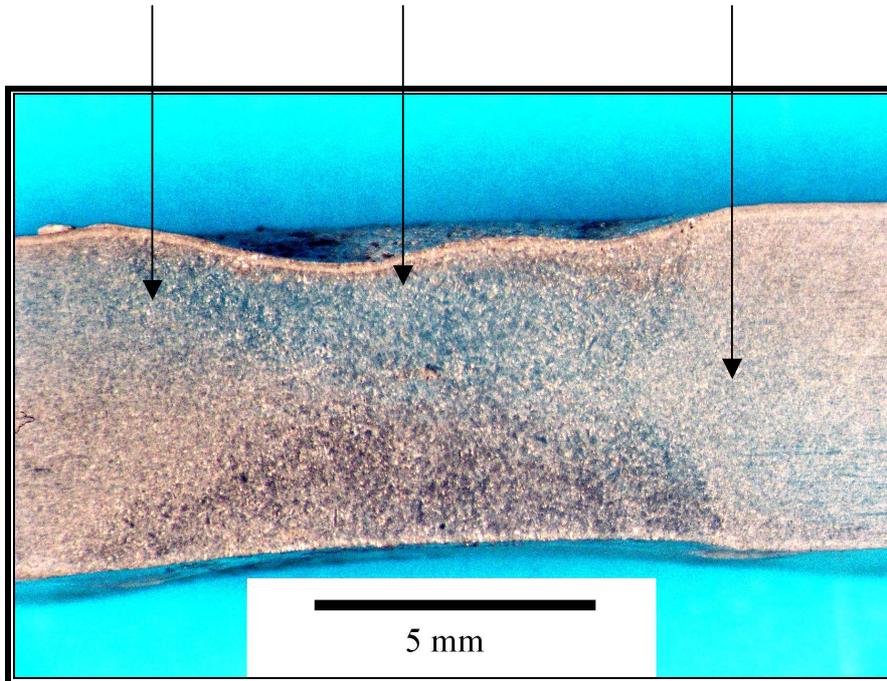


Figura 3.1.5 Macrografía mostrando la sección transversal de los cordones de la soldadura SATG entre placas de la aleación Zn-22Al-2Cu (% peso) de 6.5 mm de espesor. La soldadura se realizó empleando una corriente de 81 Amperios.

La macrografía anterior muestra la sección transversal de los cordones de soldadura SATG empleando una corriente de 81 Amperios. En la imagen, la arista de la zona de fusión superior muestra una forma ondulada, mientras que la arista de la zona de fusión inferior presenta una ligera concavidad. En este caso la soldadura fue total, pues las zonas de fusión se intersecan. De esta manera, el área de soldadura efectiva es de 166 mm^2 , la cual representa el 100% del área de la sección transversal final. Los valores de penetración y ancho de la zona de fusión para las

soldaduras superior e inferior empleando 81 Amperios se muestran en la Tabla 3.1.5.

	Penetración (mm)	Ancho de la zona de fusión (mm)	Zona afectada por el calor (mm)
Soldadura superior	3.3	10.5	2.3 – 3.4
Soldadura inferior	3.2	12.2	1.9 – 2.8

Tabla 3.1.5 Valores de penetración, ancho de zona de fusión y zona afectada por el calor para la soldadura SATG entre placas de la aleación Zn-22Al-2Cu (% peso) de 6.5 mm de espesor. La soldadura se realizó empleando una corriente de 81 Amperios.

A partir de los datos de la Tabla 3.1.5, es claro que la penetración de ambas zonas de fusión es prácticamente hasta la mitad del espesor de las placas (tomando en cuenta la reducción del espesor en este punto). Por lo tanto, ya que ambas zonas se intersecan, la estructura y composición en esta región es la misma desde la arista superior hasta la arista inferior. Pensando en las dos placas iniciales y la región soldada como un todo, se puede denominar a dicho cuerpo metálico como un material compuesto. Finalmente, el hecho de que el ancho de ambas zonas de fusión sea mayor que el espesor de las placas produjo un marcado desalineamiento entre las placas.

3.2 Estructura granular

Como fue expuesto en el Capítulo uno, la pileta líquida solidifica rápidamente una vez retirado el arco eléctrico. La solidificación de dicha pileta se

lleva a cabo según lo establecido por la teoría de la solidificación, considerando que el sólido conteniendo el líquido actúa como molde extrayendo parte del calor suministrado por el arco. De esta manera, los gradientes térmicos controlan la solidificación a medida que la antorcha se desplaza. Cabe aclarar que dichos gradientes térmicos se modifican a lo largo del proceso, pues el metal base se calienta a medida que avanza el cordón de la soldadura. Una manera de mantener constante el gradiente sería mediante refrigeración diferencial del metal base (mayor acción refrigerante a mayor calentamiento). En cuanto a la solidificación de la pileta líquida, la solidificación comienza a partir de la interfase sólido-líquido. Dependiendo de la rapidez de avance de la interfase R , los granos pueden adquirir la forma celular o dendrítica. En cuanto a la orientación de la estructura cristalina de los granos en crecimiento, generalmente está influenciada por la de los granos de la fase sólida exactamente en la interfase a través del mecanismo de crecimiento epitaxial. En cuanto a la dirección de crecimiento de las células o dendritas, éstas crecen en la dirección del flujo de calor y en sentido opuesto al mismo. Cabe mencionar que adicional al flujo de calor, en el líquido se generan flujos convectivos provocados por los gradientes térmicos; tales flujos convectivos pueden cambiar la dirección de crecimiento y en ocasiones hasta romper las células o dendritas.

La Figura 3.2.1 muestra la microestructura de la línea de fusión de la pareja soldada empleando 76 Amperios. En la parte superior de la línea de fusión pueden verse dendritas columnares de color gris circundadas por una red de color blanco; en dicha micrografía puede observarse también la dirección preferencial de crecimiento. Del análisis de composición química se pudo determinar que las fases cristalinas α'_S , η'_T y ϵ constituyen el cuerpo de la dendrita, mientras que las fases cristalinas η'_S y ϵ son las componentes de la red circundante.

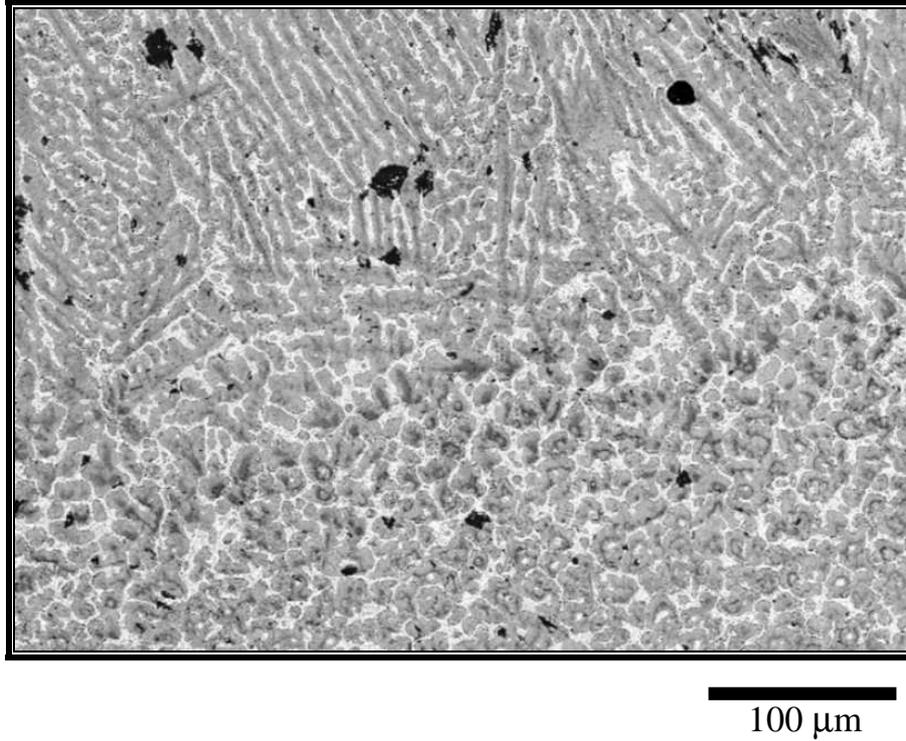
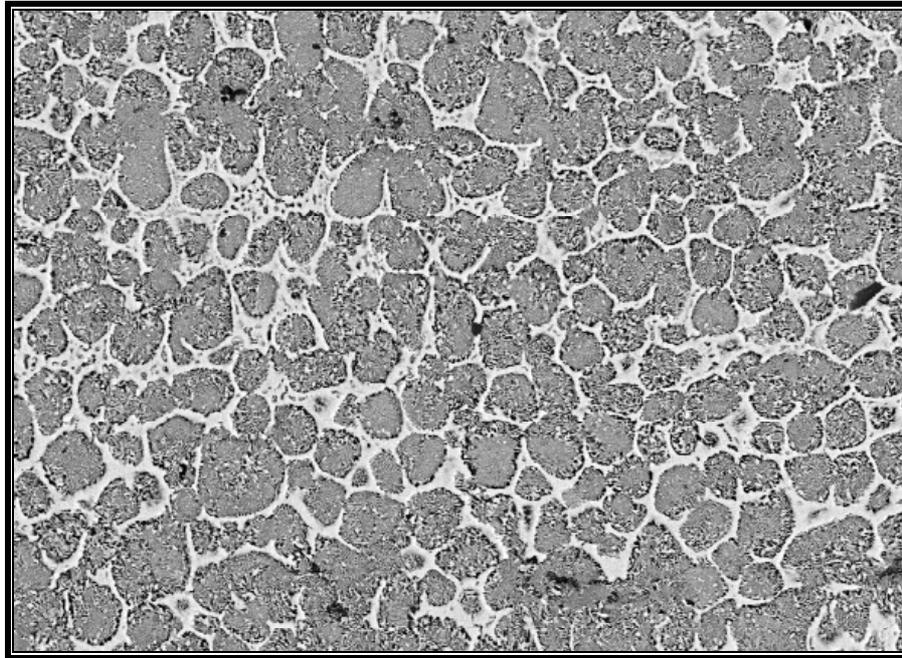


Figura 3.2.1 Microestructura de la soldadura SATG entre placas de 6.5 mm de la aleación Zn-22Al-2Cu (% peso). La soldadura se realizó empleando una corriente de 76 Amperios. Nótese la línea de fusión que separa la estructura dendrítica de la estructura equiaxiada. Las manchas negras denotan presencia de óxidos y poros. Imagen ampliada 250 X.

En la parte inferior de la línea de fusión puede observarse que la microestructura consiste de granos equiaxiados de color gris, los cuales se encuentran rodeados por una red de color blanco. Dichos granos equiaxiados son granos crecidos del metal base como consecuencia del calentamiento. La distribución de tamaño de los granos equiaxiados depende del calor suministrado y del tiempo; en este caso la distribución de tamaño se situó entre 3 μm a 12 μm . El análisis químico de los granos equiaxiados mostró que están compuestos por las

fases cristalinas α'_T , η'_T y ϵ al igual que las dendritas. La Figura 3.2.2 muestra un acercamiento de la zona de crecimiento de grano justo debajo de la línea de fusión.



10 μm

Figura 3.2.2 Microestructura de la soldadura SATG entre placas de 6.5 mm de la aleación Zn-22Al-2Cu (% peso). La soldadura se realizó empleando una corriente de 76 Amperios. Detalle a amplificación mayor de la Zona Afectada por el Calor. Imagen amplificada 1000 X.

Hay que remarcar que la microestructura mostrada forma parte de la Zona Afectada por el Calor. Además, precipitados pueden ser observados en las regiones interdendríticas e intergranulares. Dichos precipitados resultan de la descomposición de las fases sobresaturadas, ya que como consecuencia de la solidificación rápida, todas las fases son metastables.

En cuanto a la extensión de la Zona Afectada por el Calor, se encontró que tal extensión depende de la cantidad de calor suministrado a la pieza de trabajo, luego entonces de la corriente eléctrica empleada (Figura 3.2.3). Las mediciones realizadas mostraron que la Zona Afectada por el Calor se extendió dentro del metal base desde 1.4 hasta 2.6 veces el valor de penetración. También se observó que la estructura granular de la Zona Afectada por el Calor no es uniforme, sino que evolucionó desde granos equiaxiados hasta granos alargados. El hecho de que la Zona Afectada por el Calor haya evolucionado hasta granos alargados es privativo de este trabajo, pues las placas utilizadas fueron obtenidas mediante laminación (Fig. 3.2.4). Se aclara que, para los casos de placas obtenidas mediante otros procesos (es decir con otra estructura), la Zona Afectada por el Calor evolucionaría desde granos equiaxiados hasta la estructura del metal base utilizado.

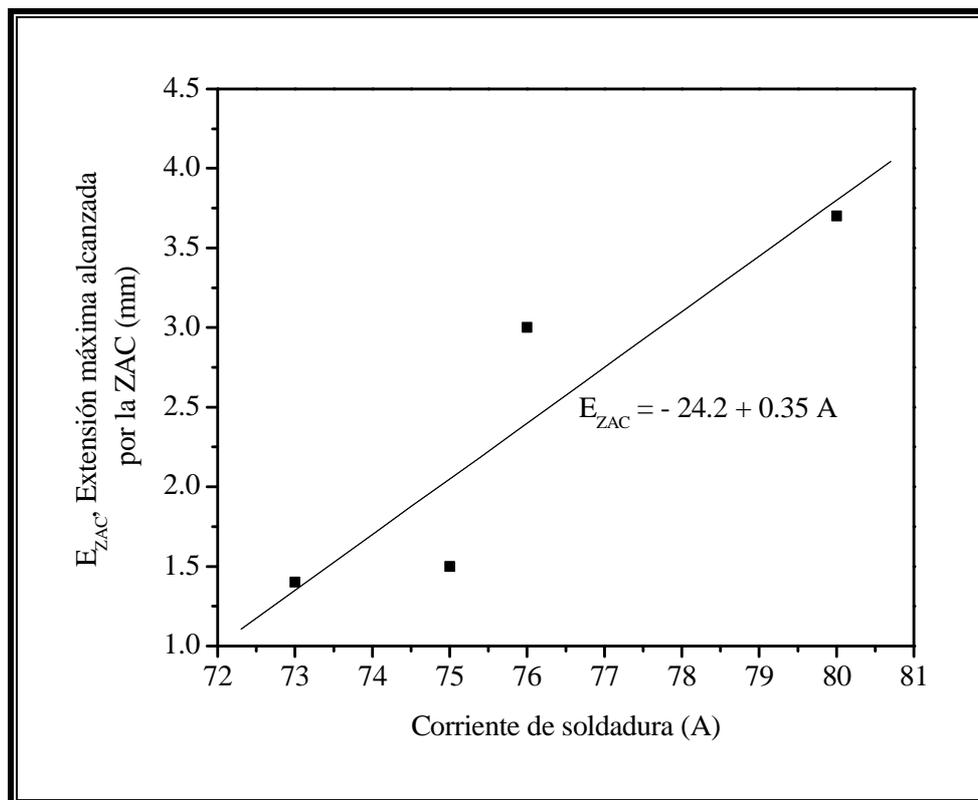


Figura 3.2.3 Gráfica Corriente de soldadura versus Extensión de la ZAC.

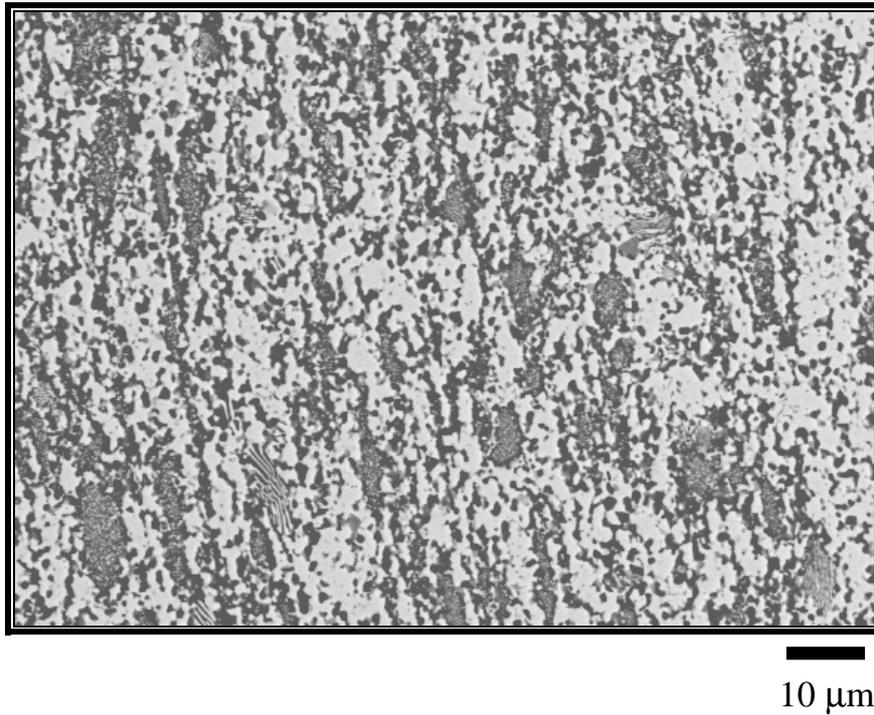


Figura 3.2.4 Microestructura de las placas laminadas de 6.5 mm de espesor de la aleación Zn-22Al-2Cu (% peso). Imagen ampliada 1000 X.

3.3 Difracción de rayos X

Los parámetros necesarios para la realización del cálculo son los parámetros de red de las fases η'_S , η'_T , α'_S , α'_T del sistema Al-Zn (Según Presnyakov y colaboradores y modificado por Goldak y Parr) y de la fase τ' ($\text{Al}_4\text{Cu}_3\text{Zn}$) del sistema Al-Cu-Zn. Una búsqueda exhaustiva en artículos científicos de dichos parámetros llevó a la recopilación de los mismos. Los valores encontrados se presentan en la Tabla 3.3.1.

Haciendo uso de las ecuaciones de la cristalografía geométrica que relacionan el espaciamiento interplanar con los índices de Miller y Bravais-Miller, a partir de una lista de planos previa se calcularon las distancias interplanares de cada plano de cada fase cristalina. Las distancias interplanares están resumidas en las Tablas 3.3.2, 3.3.3, 3.3.4, 3.3.5, 3.3.6, 3.3.7. Se hace hincapié en que en dichas Tablas solo se marcaron los planos cuyas distancias interplanares coincidieron con las determinadas mediante la aplicación de la ley de Bragg a cada uno de los picos de los difractogramas, ya que cada listado contenía alrededor de 75 planos diferentes.

Para la realización de los cálculos se hizo uso de la “hoja de cálculo” del programa de computadora llamado “ORIGIN”, la versión de dicho programa es la 6.1. También mediante este programa se graficaron los patrones de difracción de rayos X, y con su editor de texto se hicieron las anotaciones correspondientes a cada uno de los picos como se podrá ver en las Figuras 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3, 3.3.4, 3.3.5, 3.3.6.

Fase cristalina	Celda unitaria	a (Å)	c (Å)
α'_S	Cúbica centrada en las caras (CCC)	4.015-4.020* 4.0175**	
α'_T	Cúbica centrada en las caras (CCC)	4.015-4.020* 4.0175**	
τ'	Romboédrica (R)	2.879-2.887* 2.8830**	
η'_S	Hexagonal (H)	2.649-2.654* 2.6515**	4.889-4.902* 4.8955**
η'_T	Hexagonal (H)	2.649-2.654* 2.6515**	4.842-4.848* 4.8450**
ε	Hexagonal (H)	2.742-2.745* 2.7435**	4.268-4.270* 4.269**

* Valores mínimo y máximo encontrados en la literatura.

** Valor promedio.

Tabla 3.3.1 Parámetros de red de las fases α'_S , α'_T , η'_S , η'_T , ε , τ' encontrados en la literatura.

Fase cristalina	a (Å)	Plano (hkl)	$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$
α'_S	4.0150-4.0200	(111)	2.3181-2.3209 Å
α'_S	4.0150-4.0200	(002)	2.0075-2.0100 Å

Tabla 3.3.2 Distancia interplanar d_{hkl} calculada mediante la fórmula geométrica para celdas cúbicas correspondiente a la fase α'_S .

Fase cristalina	a (Å)	Plano (hkl)	$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$
α'_T	4.0150-4.0200	(111)	2.3181-2.3209 Å
α'_T	4.0150-4.0200	(002)	2.0075-2.0100 Å

Tabla 3.3.3 Distancia interplanar d_{hkl} calculada mediante la fórmula geométrica para celdas cúbicas correspondiente a la fase α'_T .

Fase cristalina	a (Å)	Plano (hkl)	$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{\frac{(h^2 + k^2 + l^2) \sin^2 \alpha + 2(hk + hl + kl)(\cos^2 \alpha - \cos \alpha)}{1 + 2 \cos^3 \alpha - 3 \cos^2 \alpha}}}$
τ'	2.8790- 2.8870	(110)	2.0358- 2.0414 Å

$$\alpha \cong 90^\circ$$

Tabla 3.3.4 Distancia interplanar d_{hkl} calculada mediante la fórmula geométrica para la celda romboédrica correspondiente a la fase τ' .

Fase cristalina	a (Å)	c (Å)	Plano (hkl)	$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{1.333(h^2 + hk + l^2) + l^2(\frac{a^2}{c^2})}}$
η'_s	2.6490- 2.6540	4.8890- 4.9020	(0002)	2.4445-2.4510 Å
η'_s	2.6490- 2.6540	4.8890- 4.9020	(10 $\bar{1}$ 0)	2.2944-2.2987 Å
η'_s	2.6490- 2.6540	4.8890- 4.9020	(10 $\bar{1}$ 1)	2.0780-2.0802 Å

Tabla 3.3.5 Distancia interplanar d_{hkl} calculada mediante la fórmula geométrica para la celda hexagonal correspondiente a la fase η'_s .

Fase cristalina	a (Å)	c (Å)	Plano (hkl)	$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{1.333(h^2 + hk + l^2) + l^2(\frac{a^2}{c^2})}}$
η'_T	2.6490- 2.6540	4.8420- 4.8480	(0002)	2.4210-2.4240 Å
η'_T	2.6490- 2.6540	4.8420- 4.8480	(10 $\bar{1}$ 0)	2.2944-2.2987 Å
η'_T	2.6490- 2.6540	4.8420- 4.8480	(10 $\bar{1}$ 1)	2.0739-2.0766 Å

Tabla 3.3.6 Distancia interplanar d_{hkl} calculada mediante la fórmula geométrica para la celda hexagonal correspondiente a la fase η'_T .

Fase cristalina	a (Å)	c (Å)	Plano (hkl)	$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{1.333(h^2 + hk + l^2) + l^2(\frac{a^2}{c^2})}}$
ϵ	2.7420- 2.7450	4.2680- 4.2700	(0002)	2.1340-2.1350 Å
ϵ	2.7420- 2.7450	4.2680- 4.2700	(10 $\bar{1}$ 0)	2.3749-2.3775 Å
ϵ	2.7420- 2.7450	4.2680- 4.2700	(10 $\bar{1}$ 1)	2.0755-2.0770 Å

Tabla 3.3.7 Distancia interplanar d_{hkl} calculada mediante la fórmula geométrica para la celda hexagonal correspondiente a la fase ϵ .

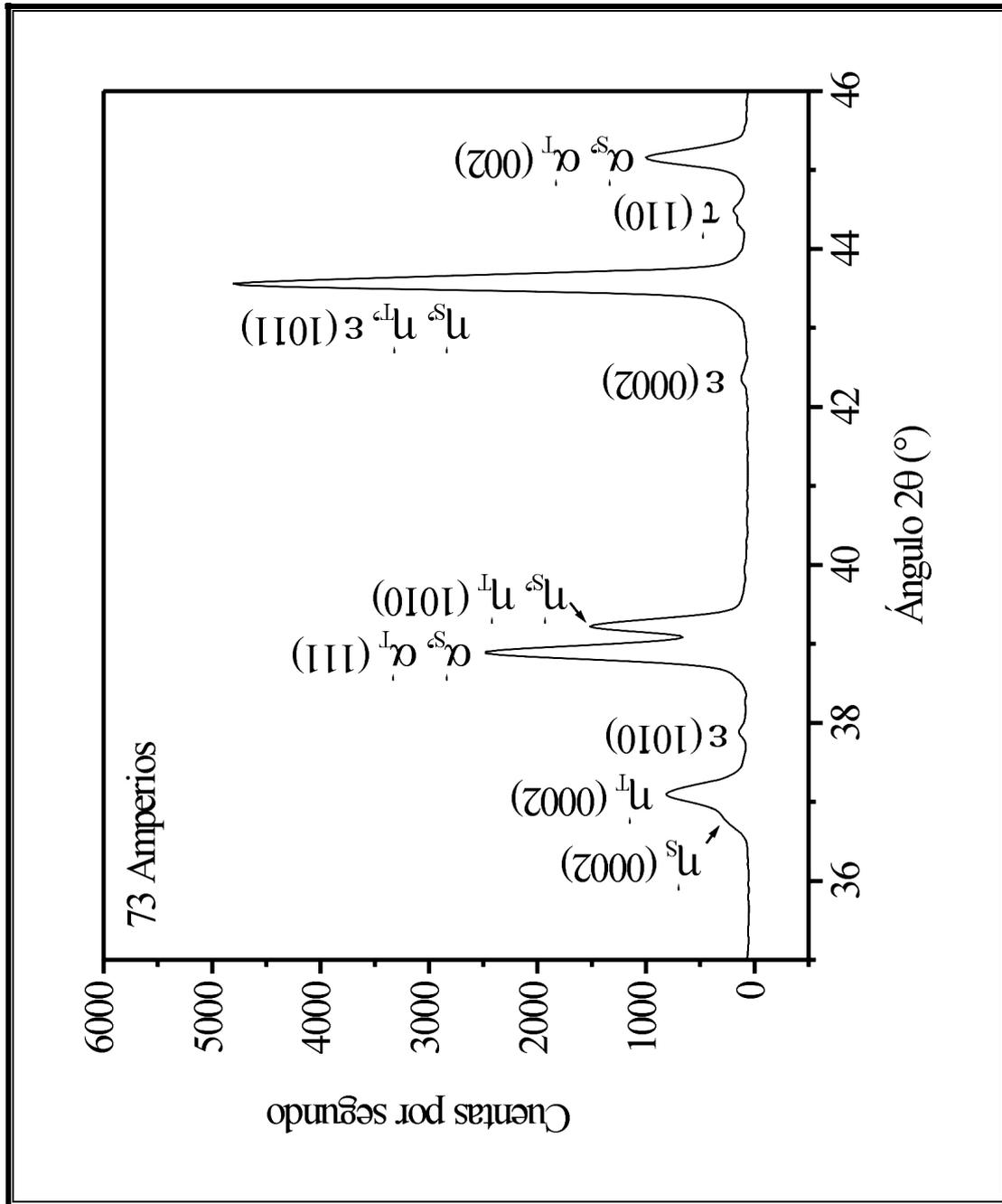


Figura 3.3.1 Patrón de difracción de rayos X obtenido de las placas de Zn-22Al-2Cu soldadas por medio de soldadura al arco con electrodo de tungsteno y protección gaseosa empleando una corriente de 73 Amperios.

Fase cristalina	Plano atómico	Posición del pico (°)	Espaciamiento interplanar-d (Å)
η'_S	(0002)	36.75	2.4455
η'_T	(0002)	37.1	2.423
ϵ	(10 $\bar{1}$ 0)	37.88	2.375
α'_S, α'_T	(111)	38.9	2.315
η'_S, η'_T	(10 $\bar{1}$ 0)	39.22	2.297
ϵ	(0002)	42.36	2.134
$\eta'_S, \eta'_T, \epsilon$	(10 $\bar{1}$ 1)	43.56	2.078
τ'	(110)	44.5	2.036
α'_S, α'_T	(002)	45.16	2.0075

Tabla 3.3.8 Datos del patrón de difracción de rayos X de la Figura 3.3.1.

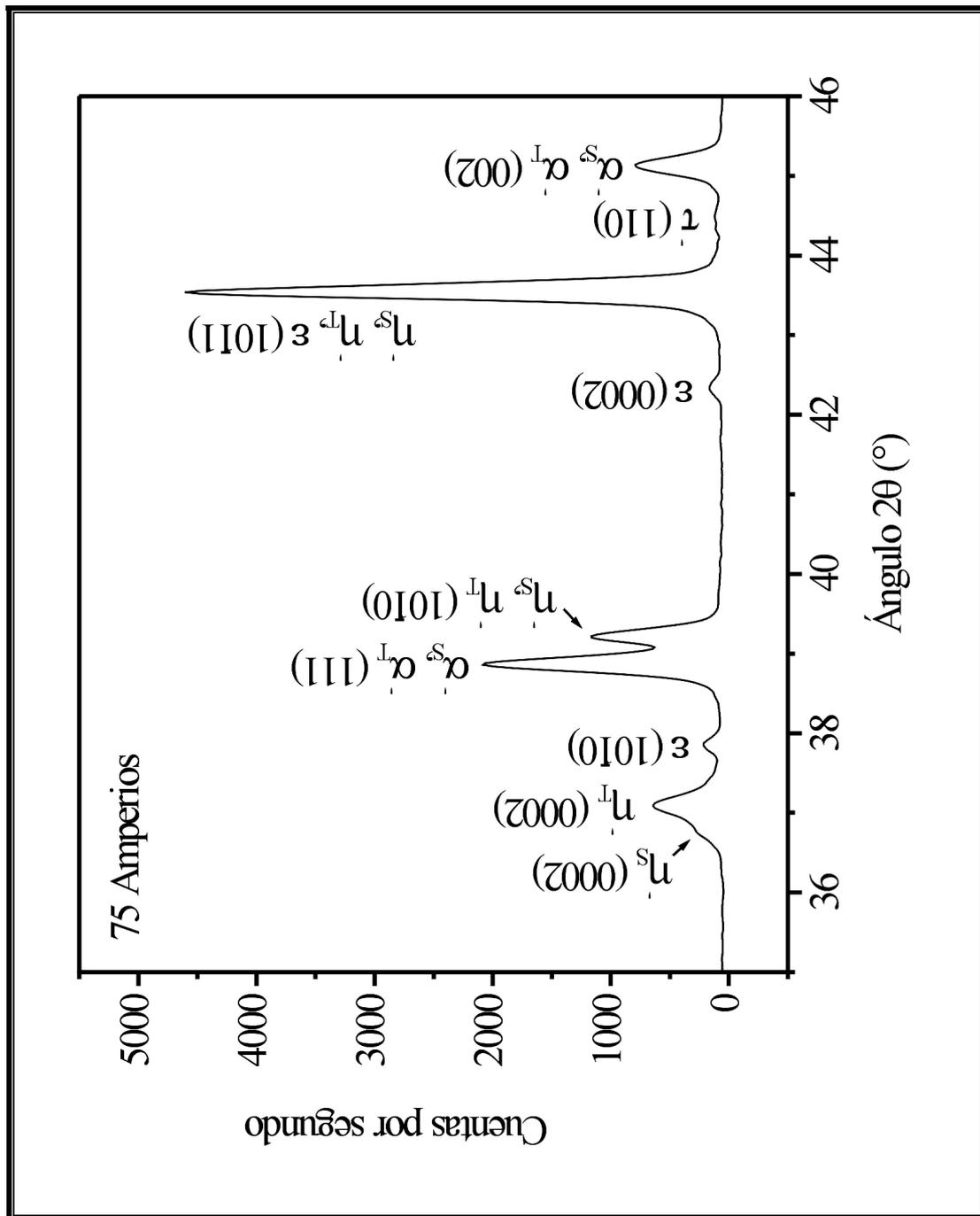


Figura 3.3.2 Patrón de difracción de rayos X obtenido de las placas de Zn-22Al-2Cu soldadas por medio de soldadura al arco con electrodo de tungsteno y protección gaseosa empleando una corriente de 75 Amperios.

Fase cristalina	Plano atómico	Posición del pico (°)	Espaciamento interplanar-d (Å)
η'_S	(0002)	36.73	2.447
η'_T	(0002)	37.08	2.424
ϵ	(10 $\bar{1}$ 0)	37.86	2.377
α'_S, α'_T	(111)	38.86	2.318
η'_S, η'_T	(10 $\bar{1}$ 0)	39.22	2.297
ϵ	(0002)	42.34	2.135
$\eta'_S, \eta'_T, \epsilon$	(10 $\bar{1}$ 1)	43.54	2.079
τ'	(110)	44.48	2.0365
α'_S, α'_T	(002)	45.14	2.009

Tabla 3.3.9 Datos del patrón de difracción de rayos X de la Figura 3.3.2.

Fase cristalina	Plano atómico	Posición del pico (°)	Espaciamiento interplanar-d (Å)
η'_S	(0002)	36.67	2.451
η'_T	(0002)	37.08	2.424
ϵ	(10 $\bar{1}$ 0)	37.86	2.377
α'_S, α'_T	(111)	38.86	2.318
η'_S, η'_T	(10 $\bar{1}$ 0)	39.26	2.2945
ϵ	(0002)	42.34	2.135
$\eta'_S, \eta'_T, \epsilon$	(10 $\bar{1}$ 1)	43.54	2.079
τ'	---	---	---
α'_S, α'_T	(002)	45.12	2.010

Tabla 3.3.10 Datos del patrón de difracción de rayos X de la Figura 3.3.3.

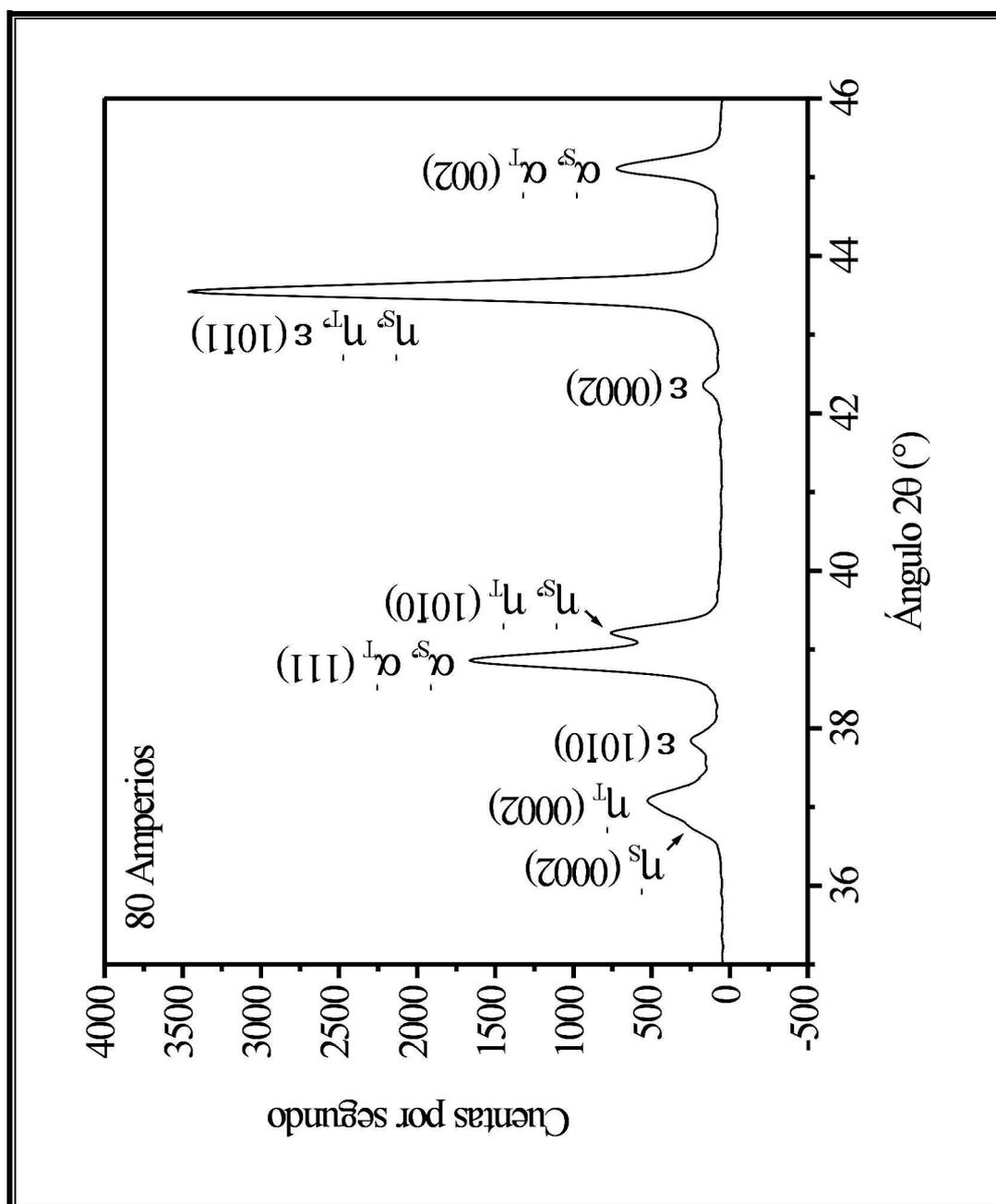


Figura 3.3.4 Patrón de difracción de rayos X obtenido de las placas de Zn-22Al-2Cu soldadas por medio de soldadura al arco con electrodo de tungsteno y protección gaseosa empleando una corriente de 80 Amperios.

Fase cristalina	Plano atómico	Posición del pico (°)	Espaciamiento interplanar-d (Å)
η'_S	(0002)	36.73	2.447
η'_T	(0002)	37.08	2.424
ϵ	(10 $\bar{1}$ 0)	37.84	2.378
α'_S, α'_T	(111)	38.86	2.318
η'_S, η'_T	(10 $\bar{1}$ 0)	39.2	2.298
ϵ	(0002)	42.36	2.134
$\eta'_S, \eta'_T, \epsilon$	(10 $\bar{1}$ 1)	43.54	2.079
τ'	---	---	---
α'_S, α'_T	(002)	45.12	2.010

Tabla 3.3.11 Datos del patrón de difracción de rayos X de la Figura 3.3.4.

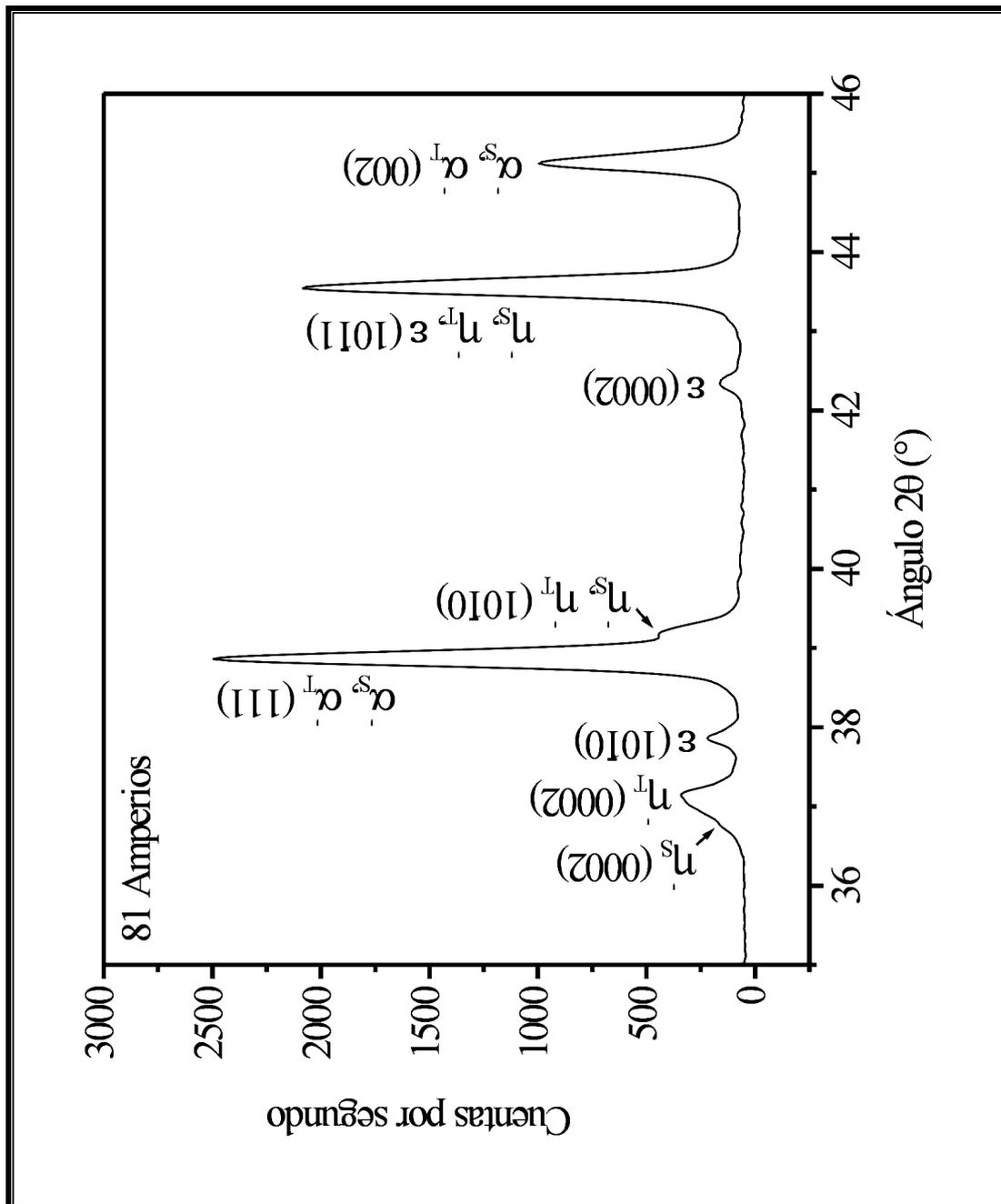


Figura 3.3.5 Patrón de difracción de rayos X obtenido de las placas de Zn-22Al-2Cu soldadas por medio de soldadura al arco con electrodo de tungsteno y protección gaseosa empleando una corriente de 81 Amperios.

Fase cristalina	Plano atómico	Posición del pico (°)	Espaciamento interplanar-d (Å)
η'_S	(0002)	36.77	2.4445
η'_T	(0002)	37.14	2.421
ϵ	(10 $\bar{1}$ 0)	37.86	2.377
α'_S, α'_T	(111)	38.86	2.318
η'_S, η'_T	(10 $\bar{1}$ 0)	39.18	2.299
ϵ	(0002)	42.34	2.135
$\eta'_S, \eta'_T, \epsilon$	(10 $\bar{1}$ 1)	43.54	2.079
τ'	---	---	---
α'_S, α'_T	(002)	45.12	2.010

Tabla 3.3.12 Datos del patrón de difracción de rayos X de la Figura 3.3.5.

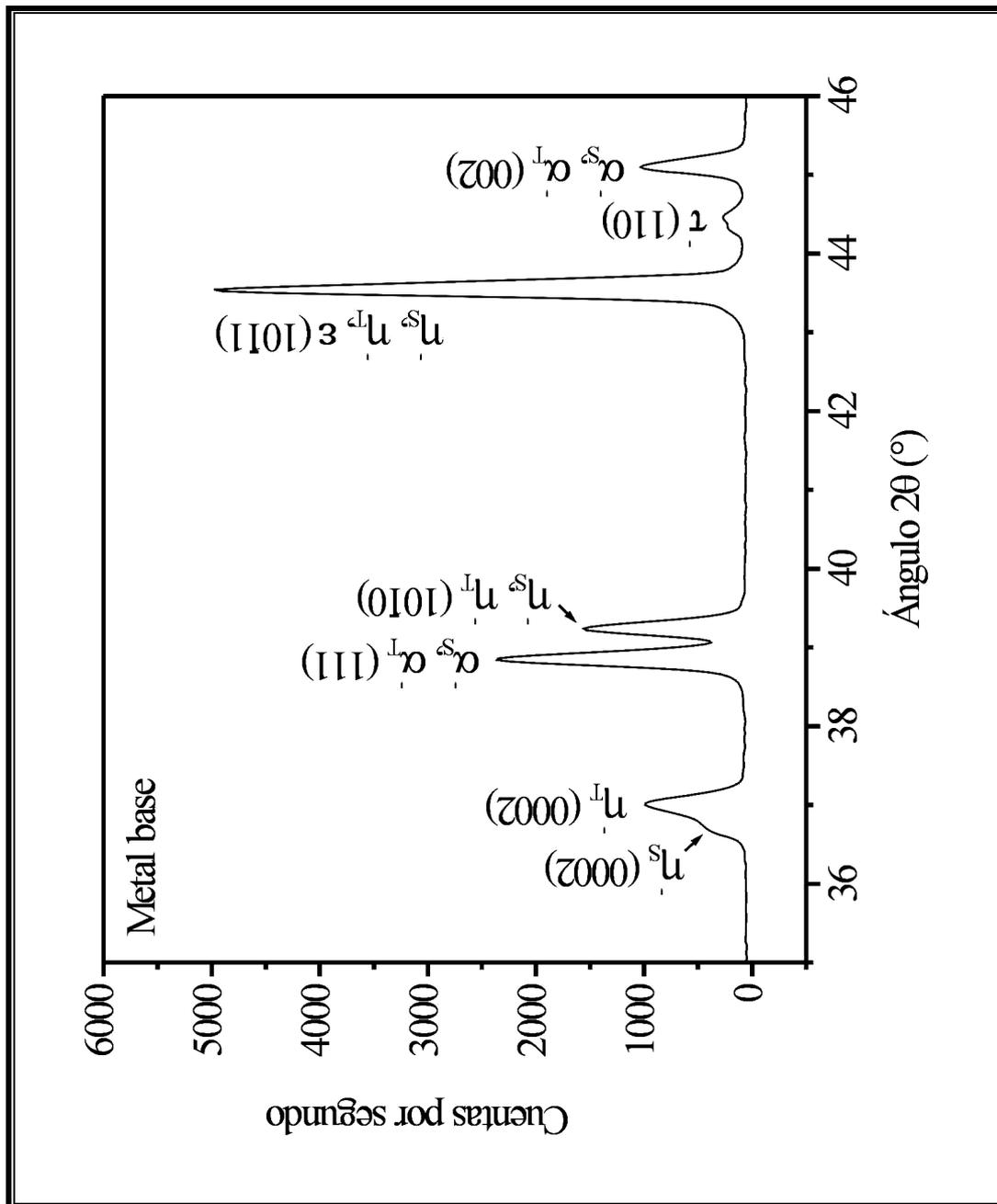


Figura 3.3.6 Patrón de difracción de rayos X obtenido de las placas de Zn-22Al-2Cu sin soldar (metal base).

Fase cristalina	Plano atómico	Posición del pico (°)	Espaciamento interplanar-d (Å)
η'_S	(0002)	36.68	2.450
η'_T	(0002)	37	2.4295
ε	---	---	---
α'_S, α'_T	(111)	38.84	2.319
η'_S, η'_T	(10 $\bar{1}$ 0)	39.24	2.296
ε	---	---	---
$\eta'_S, \eta'_T, \varepsilon$	(10 $\bar{1}$ 1)	43.54	2.079
τ'	(110)	44.46	2.0375
α'_S, α'_T	(002)	45.1	2.010

Tabla 3.3.13 Datos del patrón de difracción de rayos X de la Figura 3.3.6.

La figura 3.3.6 muestra el patrón de difracción de rayos X del metal base. El estudio de dicho espectro nos permitió identificar las fases cristalinas η'_S , η'_T , α'_S , α'_T del sistema Al-Zn (Según Presnyakov y colaboradores y modificado por Goldak y Parr) y la fase τ' ($\text{Al}_4\text{Cu}_3\text{Zn}$) del sistema Al-Cu-Zn. Las soluciones sólidas η'_S , η'_T fueron identificadas como fases ricas en zinc con celdas unitarias hexagonales; los parámetros de red de estas celdas se estimaron en $a = 2.651 \text{ \AA}$ y $c = 4.9 \text{ \AA}$, $a = 2.651 \text{ \AA}$ y $c = 4.859 \text{ \AA}$, respectivamente. Las soluciones sólidas α'_S , α'_T fueron identificadas como fases ricas en aluminio con celdas unitarias cúbicas centradas en las caras; los parámetros de red de estas celdas se estimaron tener el mismo valor $a = 4.02 \text{ \AA}$. La fase τ' fue identificada como una fase intermetálica de celda unitaria romboédrica y su parámetro de red fue estimado en $a = 2.881 \text{ \AA}$ con $\alpha \cong 90^\circ$.

Considerando el patrón de difracción de rayos X del metal base como el patrón de referencia, los patrones de difracción de las parejas soldadas muestran dos picos de difracción adicionales, a saber, los picos $(10\bar{1}0)$ y (0002) los cuales pertenecen a la fase cristalina ϵ . Además, en el patrón de difracción de la Figura 3.3.2 puede observarse que la intensidad del pico (110) de la fase τ' disminuyó. En cuanto a los patrones de difracción en las Figuras 3.3.3, 3.3.4, 3.3.5, la misma situación con respecto a la fase ϵ prevalece pero el pico (110) de la fase τ' desapareció completamente.

El hecho de que la penetración de la soldadura se haga mayor al aumentar la corriente indica que hay más calor afectando el área y en consecuencia hay incremento de la difusión atómica; tal incremento en la difusión causa que todos los componentes de la fase τ' entren en solución dentro de las fases η'_T y α'_T , lo que conduce a la desaparición del pico (110) de esta fase.

Es claro que los patrones de difracción de rayos X no discriminan el metal base de la zona soldada. Sin embargo, después del análisis y considerando el

difractograma del metal base, se puede deducir que la fase ϵ es una de las fases cristalinas que están presentes dentro de zona soldada.

Finalmente, observando la posición 2θ (37°) del pico (0002) de la fase η'_T en el metal base, se detectaron corrimientos (37.1° , 37.08° , 37.14°) del máximo de este mismo pico en los difractogramas de las parejas soldadas. Este resultado implica que el eje cristalográfico c (4.846 Å, 4.848 Å, 4.842 Å) de la fase η'_T en las parejas soldadas es más pequeño que aquel de la fase η'_T en el metal base (4.859 Å). A sabiendas que la introducción de Cu en la estructura del zinc siempre da como resultado una contracción del parámetro c , el corrimiento observado concuerda con la hipótesis de que los átomos de Cu en la fase τ' entran en solución dentro de la fase η'_T al descomponerse la fase τ' .

CONCLUSIONES

- El proceso de soldadura al arco con electrodo de tungsteno y protección gaseosa (SATG) es aplicable en la soldadura de placas de la aleación Zn-22Al-2Cu (% peso).
- La penetración de la zona de fusión dependió de la corriente eléctrica aplicada. Una corriente de 80 amperios es una condición de soldadura adecuada para el caso de placas de 6.5 mm de espesor de esta aleación.
- El proceso de solidificación de la pileta líquida se llevó a cabo en condiciones fuera de equilibrio. Como consecuencia, a medida que la pileta líquida solidificó se formaron dendritas con líquido remanente entre éstas; dichas dendritas, al final, quedaron circundadas por una mezcla de fases de diferente composición química. En base al microanálisis, se determinó que el cuerpo de la dendrita está compuesto por las fases α'_s , η'_T y ε , mientras que la mezcla de fases en la región interdendrítica está compuesta por las fases η'_s y ε .
- Dado que la solidificación se realizó de manera rápida, las fases cristalinas α'_s , α'_T , η'_s , η'_T y ε se encuentran sobresaturadas y en consecuencia son susceptibles de transformación mediante calentamiento (la zona soldada permanece caliente después de haber solidificado). Como resultado de dicha transformación algunos precipitados se formaron en las regiones interdendrítica e intergranular mediante diferentes reacciones.
- La estructura inicial de la Zona Afectada por el Calor son granos equiaxiados de composición química igual que la de las dendritas; dichos granos equiaxiados constituyen la estructura en contacto con la zona de fusión. Al igual que las dendritas, estos granos también se encuentran circundados por una mezcla de las fases η'_s y ε . En cuanto a la distribución de la forma de los granos de la Zona

Afectada por el Calor, ésta evoluciona desde los granos equiaxiados hasta granos alargados. La Zona Afectada por el Calor puede extenderse hasta 2.6 veces el valor de penetración con una corriente de 80 amperios.

- Los valores de penetración y ancho de la pileta líquida son diferentes para la segunda soldadura aplicada. Estas diferencias se atribuyen a cambios en la estructura, composición química y conductividad térmica del metal base, causados por la primera soldadura.
- Una buena apariencia de la soldadura fue obtenida mediante la aplicación del proceso de soldadura al arco con electrodo de tungsteno y protección gaseosa (SATG) en placas de la aleación Zn-22Al-2Cu (% peso).

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1.- Cullity, B. D. "Elements of X-RAY DIFFRACTION" Second Edition, Addison-Wesley Publishing Company. Inc. 1978, pags. 81-106.
- 2.- James F. Shackelford, "Ciencia de Materiales para Ingenieros", Prentice Hall Hispanoamericana S.A., tercera edición, 1992, pags. 114-119.
- 3.- Martha A. Baker, editora "Soldadura al arco con electrodo de tungsteno y protección gaseosa", Guía técnica, Hobart Institute of Welding Technology, Segunda Edición, 1995, pags. 1-31, 44-99, 107-108.
- 4.- "Syncrowave 180 SD Owner's Manual", Miller Electric, OM-360, March 2003, pags. 1-4, 9-21, 28-32.
- 5.- Merton C. Flemings, "Solidification Processing", McGraw Hill, New York, 1974, pags. 58-90.
- 6.- Felipe Díaz del Castillo R, "Endurecimiento por transformación de fase de la aleación Zn-22Al-2Cu solidificada por colada continua, extruida y trefilada", tesis de Maestría, México, 1997.
- 7.- William G. Moffatt, George W. Pearsall, John Wulff, "Estructura", Limusa – Wiley, S.A. 1968, pags. 209-223.
- 8.- Henry Horwitz, P.E. "Soldadura: aplicaciones y práctica", Alfaomega grupo editor, 1997, pags. 12-25, 359-390, 580-653.

- 9.- J. Hinojosa Torres, Y. H. Zhu, A. Herrera Vázquez, V.M. Castaño, “Strengthening of Zn-22Al-2Cu alloy wire by artificial ageing”, Materials Letters, april 2000, pags. 153-157.
- 10.- J. Hinojosa Torres, V.M. Castaño, “Properties in hardness of Zn-22Al-2Cu alloy wire artificially aged”, Materials Letters, october 2002, pags. 312-316.
- 11.- Y. H. Zhu, J. Hinojosa, T. M. Yue, W. B. Lee, “Structural evolution in a continuously cast eutectoid Zn-Al-based alloy” Materials Characterization, May 2002, pags. 315-322.
- 12.- José Ma. Gaxiola A., Vicente Maya G. “Curso de capacitación en soldadura”, Editorial Limusa S.A. 1983, pags. 143-152.
- 13.- Edward R. Bohnart, et Al. “Handbook for GTAW Gas Tungsten Arc Welding”, Miller Electric Mfg. Co., 2002. pags. 5-63.
- 14.- Smith Deane K., “Diffraction Methods”, Metals Handbook Volume 10, Ninth edition, 1986. Pags. 325-364.
- 15.- A.A. Presnyakov, Y. A. Gotban and V. C. Cherptyakova, Russian Journal of Physical Chemistry. Vol. 35, No. 6, 1961, pag. 632.
- 16.- Askeland Donald R, Phulé Pradeep P, “Ciencia e ingeniería de los materiales”, cuarta edición, Internacional Thomson Editores, 2004, pags. 357-397.

GLOSARIO

Coalescencia.- Fenómeno por el cual las gotas de un líquido, disperso en otro con el que no se mezcla, tienden a unirse entre ellas, para formar agregados mayores.

Dendrita.- Estructura arbórea del sólido que crece cuando se solidifica un líquido subenfriado.

Difracción.- Interferencia o refuerzo constructivo de un haz de rayos X o electrones que interactúa con un material. El rayo difractado proporciona información útil acerca de la estructura del material.

Epitaxia.- Proceso con el que se hace crecer un material en forma orientada, usando un sustrato que coincide cristalográficamente con el material que se está creciendo.

Fase.- Toda porción, incluyendo la totalidad del sistema, que es físicamente homogénea, y está limitada por una superficie, de modo que sea mecánicamente separable de las demás porciones.

Frente de solidificación.- La interfaz sólido-líquido.

Grano.- Cristal pequeño en un material policristalino.

Metaestable.- Estado que es estable con el tiempo, aunque no representa el equilibrio verdadero.

Nucleación.- Proceso físico por el cual se produce una fase nueva en un material. En el caso de la solidificación, indica la formación de partículas sólidas diminutas y estables en el líquido.

Reacción eutectoide.- Reacción invariante de tres fases en la que se transforma una fase sólida en dos fases sólidas distintas.

Subenfriamiento.- Temperatura a la cual se debe enfriar el metal líquido por debajo de la temperatura de equilibrio de solidificación antes de que comience la nucleación.

Solución sólida.- Fase sólida formada combinando varios elementos o compuestos en tal forma que en general la fase tiene composición y propiedades uniformes, que son distintas de las de los elementos o compuestos que la forman.

Superplasticidad.- Capacidad de un material metálico o cerámico para deformarse uniformemente una cantidad excepcionalmente grande.

Zona afectada por el calor.- El volumen del material adyacente a una soldadura que se calentó durante el proceso de soldadura a una temperatura crítica en la cual se presenta un cambio en la estructura, como crecimiento de grano o recristalización.

Zona de fusión.- Parte de una soldadura que se calienta para producir todo el líquido durante el proceso de fusión. La solidificación de la zona de fusión es la que produce la unión.