



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALURGICAS

**“UNIÓN DE ACERO INOXIDABLE AISI 316L USANDO UNA CINTA MÉTALICA
AMORFA ($\text{Ni}_{76.5}\text{Fe}_{4.2}\text{Cr}_{13}\text{B}_{2.8}\text{Si}_{4.5}$)”**

TESIS

Para obtener el Título de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN METALURGIA Y
CIENCIA DE LOS MATERIALES**

Presenta:

Mercedes Gabriela Téllez Arias

Asesor:

Dr. Jorge Alejandro Verduzco Martínez

Co-asesor:

Dr. José Lemus Ruiz.

Morelia, Michoacán

Julio 2006.

ÍNDICE

Índice de figuras	IV
Índice de tablas	X
OBJETIVOS	XIII
RESUMEN	XIV
Capítulo 1.- INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 2.- GENERALIDADES	
2.1 MATERIALES AMORFOS	6
2.1.1 ¿Qué son los materiales amorfos?	8
2.2.- VIDRIOS METÁLICOS	9
2.2.1 Estructura de los materiales amorfos	10
2.2.2 Aplicaciones potenciales de los vidrios metálicos	13
2.2.3 Aplicaciones mecánicas	13
2.2.4 Procesos para obtener aleaciones metálicas amorfas	16
2.2.5 Resistencia a la corrosión	18
2.3.- ACEROS INOXIDABLES	21
2.3.1 Propiedades del acero	22
2.3.2 Resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables	24

2.4.- UNIÓN DE ACEROS	25
2.4.1 Proceso de soldadura	28
2.4.2 Ventajas y desventajas de la soldadura	30
2.4.3 Soldadura en estado sólido	31
2.4.4 Tipos de uniones	33
2.5.- CORROSIÓN	34
2.5.1 Tipos de corrosión	35
Capítulo 3.- DESARROLLO EXPERIMENTAL	43
3.1.- MATERIALES DE INICIO	45
3.2.- CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES DE INICIO	46
3.2.1 Difracción de rayos x (DRX)	47
3.2.2 Análisis térmico diferencial (DTA)	47
3.2.3 EDS	48
3.3.- PROCEDIMIENTO DE UNIÓN	48
3.3.1 Microscopía de fuerza atómica (MFA)	49
3.4.- UNIONES POR DIFUSIÓN EN FASE SÓLIDA	50
3.4.1 Equipo experimental	51
3.5.- CARACTERIZACIÓN DE UNIONES	54
3.5.1 Ataques químicos	55
3.6.- PRUEBA MECÁNICA	56
3.6.1 Ensayo de tensión al corte	56
3.7.- ENSAYOS DE CORROSIÓN	59
Capítulo 4.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	
4.1.- MATERIALES DE INICIO	60
4.1.1 Cinta metálica amorfa ($Ni_{76.5}Fe_{4.2}Cr_{13}B_{2.8}Si_{4.5}$)	61
4.1.2 Acero Inoxidable 316L	64

4.2.- UNIONES ACERO INOXIDABLE 316L / ALEACIÓN AMORFA (Ni _{76.5} Fe _{4.2} Cr ₁₃ B _{2.8} Si _{4.5}) / ACERO INOXIDABLE 316L	69
4.2.1 Caracterización interfacial de la unión de acero inoxidable 316L / Aleación amorfa (Ni _{76.5} Fe _{4.2} Cr ₁₃ B _{2.8} Si _{4.5})/ acero inoxidable 316L	70
4.2.2 Microanálisis puntual	73
4.3.- EVALUACIÓN MECÁNICA INTERFACIAL	85
4.3.1 Análisis de la fractura	88
4.4.- MEDICIONES ELECTROANÁLITICAS	94
Capítulo 5.- CONCLUSIONES	104
REFERENCIAS	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 Métodos de unión	3
Fig. 1.2 Estructuras tipo panel	4
Fig. 1.3 Aplicaciones comerciales de las cintas metálicas amorfas	4
Fig. 2.1 Agujeros básicos que constituyen el modelo de Bernal de estructura DRP	12
Fig. 2.2 Diagrama de los procesos de obtención de las aleaciones metálicas amorfas	17
Fig. 2.3 Cinco tipos básicos de uniones	33
Fig. 2.4 Clasificación morfológica de los diferentes tipos de corrosión	36
Fig. 3.1 Diagrama de flujo de la ruta experimental utilizada	44
Fig. 3.2 Esquema generalizado del Microscopio de Fuerza Atómica	49

Fig. 3.3 Arreglo tipo Sándwich	50
Fig. 3.4 Porta muestra de grafito donde se puede observar el arreglo tipo sándwich de las muestras a unir	51
Fig. 3.5 Horno Tubular empleado en los experimentos de unión	52
Fig. 3.6 Esquema descriptivo del Horno Tubular	53
Fig. 3.7 Ciclo de calentamiento	54
Fig. 3.8 Diseño para unir las probetas para prueba de tensión al corte	57
Fig. 3.9 Uniones montadas en mordazas especialmente diseñadas para realizar la prueba mecánica	58
Fig. 3.10 Máquina Universal INSTRON	58
Fig. 3.11 Potenciostato / Galvanostato ACM MODEL GILLAC	59
Fig. 4.1 Difractograma de la cinta metálica amorfa	61
Fig. 4.2 Análisis térmico diferencial de la cinta $Ni_{76.5}Fe_{4.2}Cr_{13}B_{2.8}Si_{4.5}$	62
Fig. 4.3 Superficie de la cinta metálica amorfa	63
Fig. 4.4 Superficie del acero inoxidable 316L	65

Fig. 4.5 Imagen de 3D por MFA del Acero Inoxidable 316L 5 x 5nm	66
Fig. 4.6 Imagen por MFA del Acero Inoxidable 316L	66
Fig. 4.7 Imagen de 3D por MFA del Acero Inoxidable 316 L 20 x 20nm	66
Fig. 4.8 Micrografía del acero inoxidable 316L sometida al ataque químico	67
Fig. 4.9 Sección transversal de la zona de unión para muestras tratadas a 1105° C para: (a) 5 minutos y (b) 10 minutos en una atmósfera de N ₂	70
Fig. 4.10 Sección transversal de la zona de unión para muestras tratadas a 1105° C para: (a) 20 minutos y (b) 40 minutos en una atmósfera de N ₂	71
Fig. 4.11 Sección transversal de la zona de unión para muestras tratadas a 1170° C para: (a) 5 minutos y (b) 10 minutos en una atmósfera de N ₂	72
Fig. 4.12 Sección transversal de la zona de unión para muestras tratadas a 1170° C para: (a) 20 minutos y (b) 40 minutos en una atmósfera de N ₂	72

Fig. 4.13 Análisis puntual a través de la interfase para la muestra unida a 1105° C por 5 minutos	73
Fig. 4.14 Resultados de los análisis realizados en los puntos mostrados en la interfase de la figura 4.13	75
Fig. 4.15 Distribución atómica en la interfase de una muestra Al 316L/ cinta / Al 316L unida a 1105° C por 5 minutos	76
Fig. 4.16 Interfase del sistema Al 316L / cinta / Al 316L de una muestra unida a 1105° C por 20 minutos	77
Fig. 4.17 Interfase del sistema Al 316L / cinta / Al 316L de una muestra unida a 1105° C por 40 minutos	79
Fig. 4.18 Análisis puntual a través de la interfase para la muestra unida a 1170° C por 5 minutos	80
Fig. 4.19 Resultados de los análisis realizados en los puntos mostrados en la interfase de la figura 4.18	82
Fig. 4.20 Interfase del sistema Al 316L / Aleación amorfa / Al 316L de una muestra unida a 1170° C por 20 minutos	83
Fig. 4.21 Interfase del sistema Al 316L / Cinta / Al 316L de una muestra unida a 1170° C por 40 minutos	84
Fig. 4.22 Muestra unida para la prueba de tensión al corte	85

Fig. 4.23 Efecto del tiempo de unión en la resistencia a la tensión al corte para muestras unidas a 1105 y 1170° C	86
Fig. 4.24 Imagen de la fractura a 1105° C por 5 minutos, después de la prueba mecánica de tensión al corte	88
Fig. 4.25 Imagen de la fractura a 1105° C por 5 minutos, después de la prueba mecánica de tensión al corte, correspondiente a la parte opuesta de la muestra	90
Fig. 4.26 Imagen de la fractura a 1170° C por 5 minutos, después de la prueba mecánica de tensión al corte	91
Fig. 4.27 Imagen de la fractura a 1170° C por 5 minutos después de la prueba mecánica de tensión al corte, correspondiente a la parte opuesta de la muestra	93
Fig. 4.28 Fotografías de la zona de unión para muestras tratadas en una solución 3.5% NaCl: (a) 1105° C por 5 minutos, (b) 1170° C por 5 minutos y (c) curva de polarización para ambas muestras	97
Fig. 4.29 Fotografías de la zona de unión para muestras tratadas en una solución 3.5% NaCl: (a) 1105° C por 10 minutos, (b) 1170° C por 10 minutos y (c) curva de polarización para ambas muestras	98

- Fig. 4.30 Fotografías de la zona de unión para muestras tratadas en una solución 3.5% NaCl: (a) 1105° C por 15 minutos, (b) 1170° C por 15 minutos y (c) curva de polarización para ambas muestras 99
- Fig. 4.31 Fotografías de la zona de unión para muestras tratadas en una solución 3.5% NaCl: (a) 1105° C por 20 minutos, (b) 1170° C por 20 minutos y (c) curva de polarización para ambas muestras 100
- Fig. 4.32 Fotografías de la zona de unión para muestras tratadas en una solución 3.5% NaCl: (a) 1105° C por 40 minutos, (b) 1170° C por 40 minutos y (c) curva de polarización para ambas muestras 101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Procesos de soldadura de presión por fuente de energía	31
Tabla 3.1 Propiedades Físicas de la cinta metálica amorfa	45
Tabla 3.2 Composición % peso de la cinta metálica amorfa	45
Tabla 3.3 Composición química del acero inoxidable 316L	46
Tabla 3.4 Propiedades Mecánicas del Acero Inoxidable 316L	46
Tabla 4.1 Análisis por EDS de la Cinta metálica amorfa base níquel	63
Tabla 4.2 Propiedades Químicas de la cinta metálica amorfa	64
Tabla 4.3 Análisis por EDS del Acero Inoxidable 316L	65
Tabla 4.4 Propiedades físicas de los aceros inoxidables	68
Tabla 4.5 Resultados de la unión AI 316L / cinta/ AI 316L en Nitrógeno	69

Tabla 4.6 Resultados de EPMA de los puntos señalados en la interfase del sistema Al 316L/cinta/ Al 316L para la muestra unida a 1105 por 5 min., mostrada en la figura 4.13	74
Tabla 4.7 Resultados por EDS en la interfase del sistema Al 316L/cinta/ Al 316L a 1105° C por 20 min	78
Tabla 4.8 Resultados por EDS en la interfase del sistema Al 316L/cinta/ Al 316L a 1105° C por 40 min	79
Tabla 4.9 Resultados de EPMA de los puntos señalados en la interfase del sistema Al 316L/Cinta/ Al 316L para la muestra unida a 1170 por 5 min., mostrada en la figura 4.18	81
Tabla 4.10 Resultados por EDS en la interfase del sistema Al 316L/ Cinta/ Al 316L a 1170° C por 20 min	83
Tabla 4.11 Resultados por EDS en la interfase del sistema Al 316L/Cinta/ Al 316L a 1170° C por 40 min	84
Tabla 4.12 Resultados por EDS de la fractura del sistema Al 316L/Cinta/ Al 316L a 1105° C por 5 minutos, después de la prueba de tensión al corte	89
Tabla 4.13 Resultados por EDS de la fractura del sistema Al 316L/Cinta/ Al 316L a 1105° C por 5 minutos, después de la prueba de tensión al corte, correspondientes a la parte opuesta de la muestra	90

Tabla 4.14 Resultados por EDS de la fractura del sistema Al 316L/Cinta/ Al 316L a 1170° C por 5 minutos, después de la prueba de tensión al corte	92
Tabla 4.15 Resultados por EDS de la fractura del sistema Al 316L/Cinta/ Al 316L a 1170° C por 5 minutos, después de la prueba de tensión al corte, correspondientes a la parte opuesta de la muestra	94
Tabla 4.16 Potenciales de corrosión a 1105° C	95
Tabla 4.17 Potenciales de corrosión a 1170° C	95

OBJETIVOS

Desde tiempos remotos, la habilidad de unir materiales similares o diferentes ha sido importante en la creación o fabricación de herramientas útiles, productos o estructuras. Se han fabricado los materiales más diversos en los componentes más sofisticados y estos materiales a su vez se han unido en las maneras más diversas y eficaces para producir ensambles más sofisticados.

Por lo tanto el **OBJETIVO PRINCIPAL** de este trabajo consiste en:

- Unir acero inoxidable 316L usando una cinta metálica amorfa como material de unión, bajo diferentes tiempos y temperaturas, para así determinar qué parámetros son los óptimos para obtener uniones más fuertes por difusión sólida.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Realizar un estudio microestructural de la unión de acero inoxidable 316L, evaluando la presencia de fases y analizar la resistencia al corte de las uniones.
- Hacer un ensayo de corrosión en las uniones de acero inoxidable 316L, usando como medio una solución acuosa de NaCl para así evaluar la resistencia a la corrosión.

RESUMEN

En el presente trabajo se presenta la unión de aceros inoxidable AISI 316L (utilizado en intercambiadores de calor) empleando una cinta metálica amorfa comercial $Ni_{76.5}Fe_{4.2}Cr_{13}B_{2.8}Si_{4.5}$ (Metglas ©) como material de aporte, las uniones se llevaron a cabo bajo diferentes tiempos y temperaturas para determinar los parámetros óptimos de unión. La estructura amorfa de la cinta se comprobó mediante rayos-x, así como la temperatura de fusión mediante Análisis Diferencial de Temperatura (DTA), obteniendo como resultado una temperatura de unión entre 910 y 1330° C. Análisis de rugosidad en las probetas de acero inoxidable previas a la unión fueron obtenidas por Microscopía de Fuerza Atómica (MFA). La unión de los materiales se realizó en muestras tipo sándwich empleando dos probetas de acero con una lámina de la aleación amorfa entre ellos, a dos diferentes temperaturas, 1105° C y 1170° C, así como a diferentes tiempos de unión (5, 10, 15, 20 y 40 minutos). La caracterización interfacial se realizó mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) usando la técnica EDS. Los resultados muestran uniones favorables a una temperatura de 1105° C observándose que hay una mejor unión a partir de los 10 minutos ya que no se observan zonas con falta de unión. Por otro lado, se observa que en las uniones a 1170° C se obtiene mayor difusión a partir de 20 minutos. La unión se llevó a cabo mediante la difusión reacción química entre los materiales caracterizándose por una ausencia de porosidad remanente, así como de fisuras en la interfase. La zona de unión está compuesta por diferentes fases entremezcladas entre sí.

Se llevaron a cabo pruebas de tensión al corte en una máquina universal Instron. Para realizar estas pruebas se unieron probetas de 7 x 1 cm., las cuales se unieron a las mismas temperaturas y tiempos ya mencionados, estas probetas se

unieron bajo el diseño de la Norma ANSI/AWS C3.2-82, conforme al apartado 1. Los resultados muestran que las uniones son más resistentes al aumentar la temperatura con valores aceptables para este sistema. Las máximas resistencias al corte obtenidas fueron de 85.38 y 84.26 MPa correspondientes a 1105 y 1170° C, respectivamente.

Así mismo se realizaron ensayos electroquímicos para evaluar la resistencia a la corrosión de las uniones en una solución salina (3.5% en peso de NaCl), estos ensayos se realizaron en probetas de 1 x 1cm, unidas por el proceso antes descrito. Las probetas ya unidas se cortaron de manera transversal y se pulieron a espejo. Se les tomó fotografías a las probetas en un microscopio óptico. Después las probetas fueron inmersas en la solución hasta que el potencial se estabilizó. Una vez que el potencial de circuito abierto presentaba estabilidad las muestras se polarizaron potenciodinámicamente. El comportamiento electroquímico de las uniones muestra una tendencia a la disolución preferencial de la cinta lo que a su vez genera corrosión por hendiduras en la frontera acero / cinta / acero cuando ésta se encuentra polarizada anódicamente. En estas pruebas se observa que los potenciales de corrosión de las muestras tratadas a la temperatura de 1105° C son más activos que los de las muestras tratadas a 1170° C.

CAPÍTULO: 1

INTRODUCCIÓN

Con la tecnología de la solidificación rápida, se ha logrado obtener materiales metálicos con ordenamiento atómico de corto alcance ⁽¹⁾ (conocidos como vidrios metálicos), lo cual proporciona propiedades únicas en diversas formas, por ejemplo cintas y alambres. Siendo las cintas las más explotadas desde sus inicios en diversas aplicaciones debido a sus propiedades magnéticas y eléctricas como es el caso de cabezas de grabación ⁽²⁾, sensores magnéticos ⁽³⁾ y posteriormente en corazones de transformadores de poder ^(4,5). Por otro lado, algunas aleaciones ternarias base Fe, Co y Ni con la presencia de un elemento de transición, como el Cr, poseen altas resistencias a la corrosión, aún en medios corrosivos como 1N HCl ⁽⁶⁾, esto gracias a la homogeneidad química y pasivación espontánea de una película de óxido de cromo. Además, puntos de fusión relativamente bajos de este tipo de aleaciones las han hecho apropiadas para usarlas también como materiales de unión en diversos materiales, por ejemplo en las juntas que se desgastan por abrasión en turbinas para avión, en la unión metal/cerámico, equipos de ortodoncia ⁽⁷⁾, así como también en intercambiadores de calor ⁽⁸⁾.

Han existido tres aspectos que limitan la aplicación estructural de los vidrios metálicos; el tamaño, la forma de elaboración y la soldabilidad. Los aspectos de

tamaño y elaboración se han resuelto con el descubrimiento de los vidrios metálicos en bulto, que tienen un superenfriamiento grande de la región líquida antes de la cristalización ⁽⁹⁻¹¹⁾. Estos vidrios metálicos exhiben una superplasticidad de tensión alta y una excelente elaboración ⁽¹²⁾ en el superenfriamiento desde el estado líquido. El asunto de unir, sin embargo ha seguido siendo una limitación.

Recientemente, se ha resuelto el problema de unión por medio de cuatro métodos: soldadura de explosión, corriente de pulso, haz de electrón y fricción ⁽¹³⁾. Se han soldado vidrios metálicos en bulto con éxito guardando su estado amorfo por los métodos de corriente de pulso ⁽¹⁴⁻¹⁶⁾, haz de electrón ⁽¹⁷⁾ y métodos de fricción ^(14,15, 18). Además, se han soldado vidrios metálicos en bulto satisfactoriamente con metales cristalinos por métodos de explosión ^(115,19), haz de electrón ⁽²⁰⁾ y métodos de fricción ⁽¹⁴⁾. Los métodos de corriente de pulso y haz de electrón son procesos en fase líquida. Por otro lado los métodos de explosión y de fricción también son conocidos como procesos en fase sólida. Otro método para unir vidrios metálicos es el proceso brazing. En la Figura 1.1 (a), (b), (c) y (d) se presentan ejemplos de los métodos de unión por explosión, por corriente de pulso, haz de electrón y de fricción respectivamente.

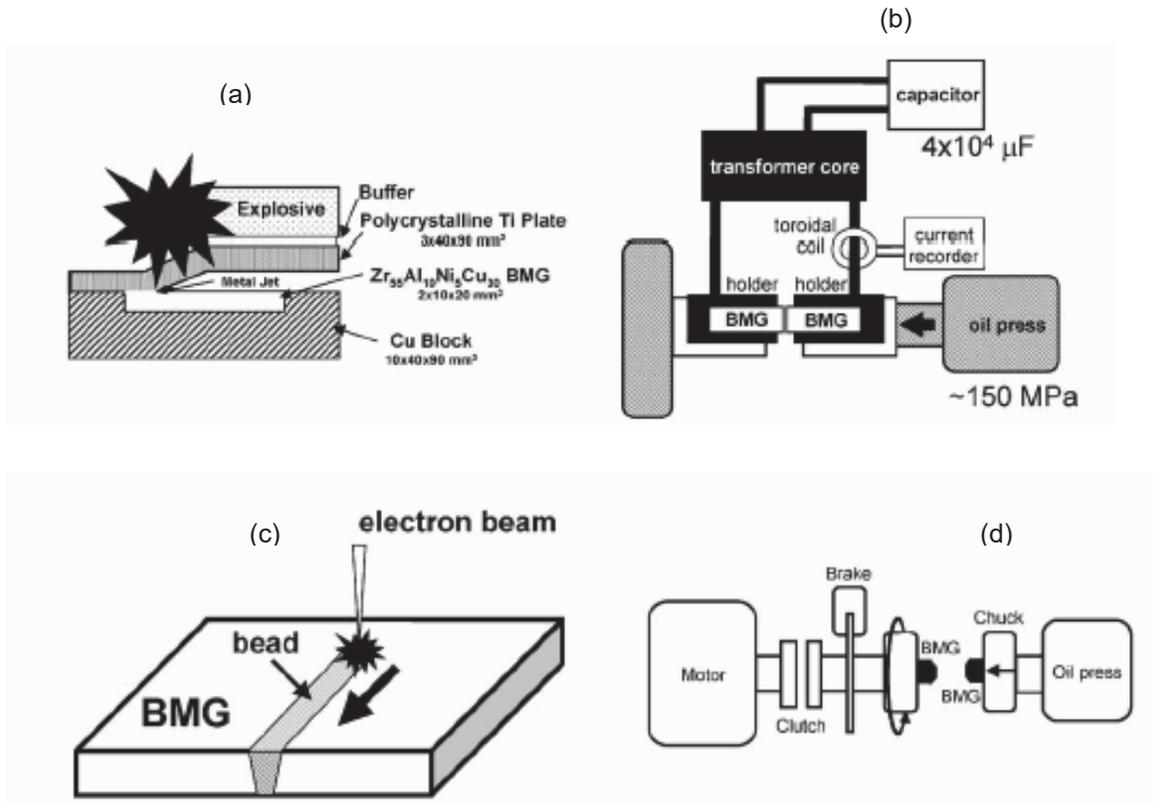


Figura 1.1 Métodos de unión: (a) explosión; (b) corriente de pulso; (c) haz de electrón; (d) fricción ⁽¹³⁾.

Los materiales que se unen por Brazing y soldadura son una práctica antigua que ha evolucionado en una tecnología moderna sofisticada a través de las varias innovaciones, como el uso de metales del relleno rápidamente solidificados. Las aplicaciones de los metales amorfos son variadas, por ejemplo, para sellar artefactos de avión fue una de sus primeras aplicaciones comerciales, otra aplicación es que pueden ser usados en intercambiadores de calor y en forma de panel ⁽²¹⁾. En la Figura 1.2 (a) y (b) se muestran imágenes de estructuras tipo panel. En la Figura 1.3 (a), (b) y (c) se presentan imágenes de las diferentes aplicaciones comerciales de las cintas metálicas amorfas

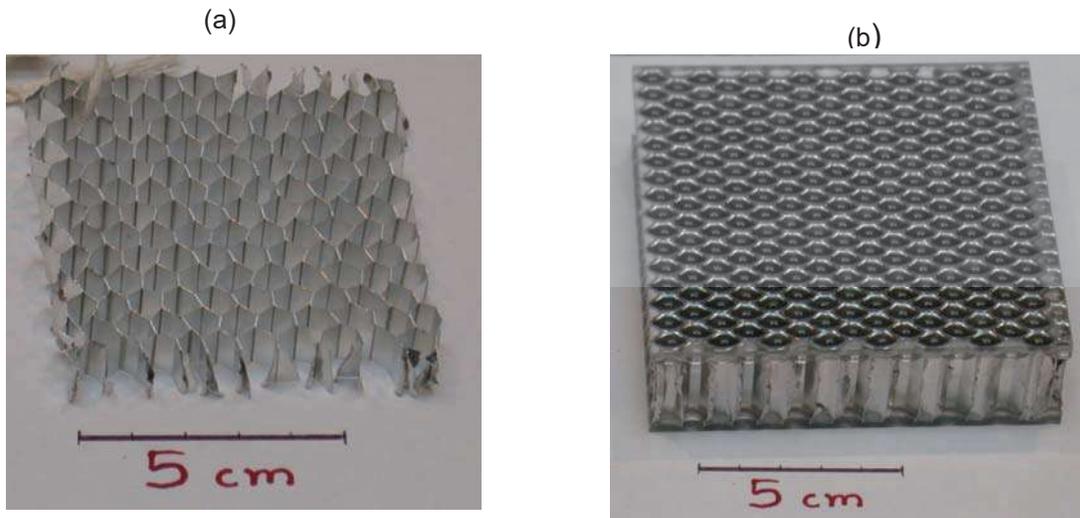


Figura 1.2 Estructuras tipo panel

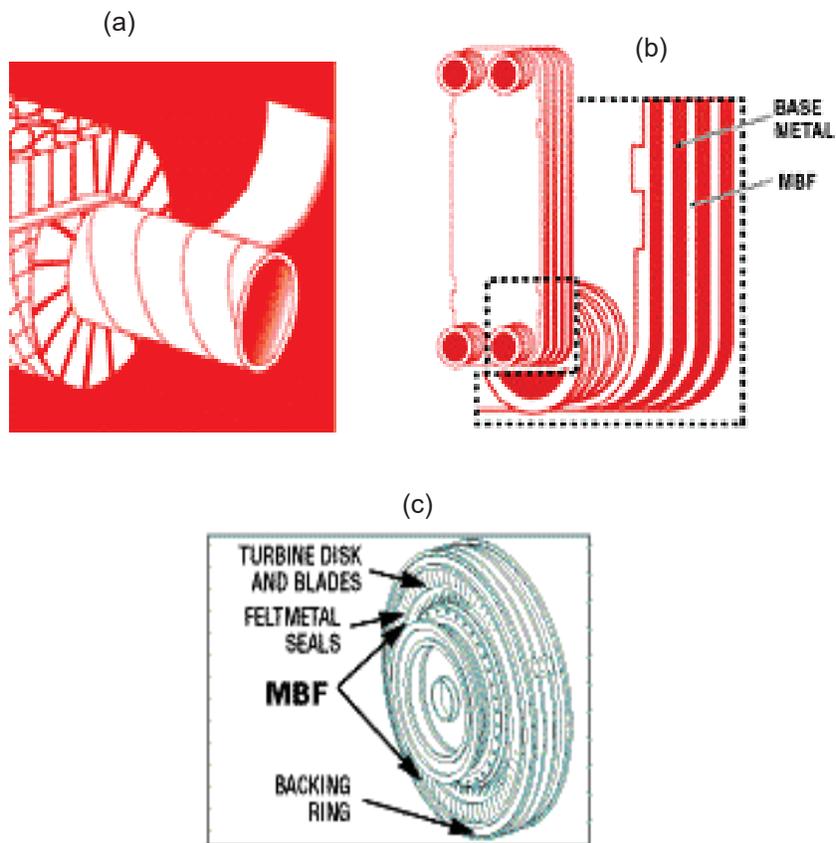


Figura 1.3 Aplicaciones comerciales de las cintas metálicas amorfas: (a) catalizadores; (b) unión tipo sándwich en un intercambiador de calor; (c) turbina comercial de gas para resistir altas temperaturas y estrés presente.

Los metales amorfos tienen un límite elástico alto y una alta resistencia las cuales son comparadas con las aleaciones cristalinas convencionales ⁽²²⁾. Las ventajas que ofrecen los vidrios metálicos además de tener bajos puntos de fusión son: ductilidad, homogeneidad química y microestructural, además de tener secciones delgadas. Muchas aleaciones de unión son frágiles debido al contenido de elementos reductores de temperatura de fusión, tales como fósforo, boro y silicio. Así, una forma convencional de aleaciones de unión es la pasta, en las cuales se forman de aleaciones de polvos usando aglutinante. La aplicación en esta forma es conveniente ya que el metal compuesto de relleno se puede colocar directamente en la junta de las dos piezas base a ser unidas. La solidificación rápida puede resultar en la producción de la misma composición del metal de relleno, pero en cinta dúctil o en forma de polvo. La razón de esto es que exactamente los mismos elementos que se adicionan al metal de relleno para bajar el punto de fusión también son formadores de vidrio de la aleación cuando es solidificada rápidamente. De esta forma, resultan metales de relleno dúctiles y densos con bajas temperaturas de fusión. Además, la laminilla puede ser estampada en preformas permitiendo que los huecos de las piezas del metal sean llenados más eficientemente durante la unión. Un nuevo grupo de metales amorfos de relleno con un contenido alto de cromo se han desarrollado para aplicaciones en ambientes corrosivos y/o para altas temperaturas ⁽⁸⁾.

CAPÍTULO: 2

GENERALIDADES

2.1. MATERIALES AMORFOS

Los sólidos existen porque su formación minimiza la energía de un conjunto de átomos o moléculas que interactúan entre sí. Esta regla fundamental de la naturaleza explica en gran medida la estructura del mundo que nos rodea, lo cual no deja de ser sorprendente si tomamos en cuenta que los núcleos atómicos tienden a repelerse, debido a sus cargas eléctricas del mismo signo.

Desde fines del siglo XIX se pensaba que los electrones, con sus cargas opuestas a los núcleos, deberían tener el papel de estabilizar los sólidos, actuando como el “elemento” que une a los átomos. Estas ideas fueron desarrolladas y para 1930 existía una teoría del estado sólido que explicaba diversos fenómenos con gran éxito. Esta teoría partía del hecho de que los materiales sólidos con energías más bajas son siempre cristalinos. Al decir cristalinos, se hace referencia a que la estructura total consiste en la repetición, sobre las tres direcciones del espacio, de una celda o motivo básico atómico.

En 1932 ya se sabía con certeza que los vidrios comunes no son cristales. La estructura de un vidrio es desordenada o amorfa, en dichas estructuras no hay periodicidad a largo alcance, debido a que los ángulos de los enlaces entre átomos tienen pequeñas variaciones. Estas variaciones se van acumulando a grandes distancias, produciendo desorden estructural.

Muchos materiales caen en la categoría de desordenados; entre ellos, los plásticos (los cuales superan en volumen de producción anual a cualquier aleación metálica). Existen otras clases de amorfos, como los vidrios metálicos, los vidrios de espín, los vidrios calcogenoides, los cristales líquidos y los semiconductores amorfos.

Desde tiempos muy remotos, los materiales desordenados han tenido un impacto muy importante en dos áreas claves para el desarrollo de la civilización: la economía y la energía.

Hay dos ventajas al utilizar un material desordenado: la primera es que se puede diseñar el orden atómico local sin las restricciones debidas a la simetría que existen en un cristal. Esto permite obtener nuevas configuraciones de enlaces químicos y ordenes locales; así se pueden crear nuevos materiales con propiedades químicas y electrónicas convenientes a una aplicación dada. La segunda ventaja fundamental es de carácter económico; para hacer crecer cristales, normalmente se requiere mucho tiempo y ambientes muy controlados, por lo que el costo es muy alto. Los materiales desordenados se producen de manera muy sencilla y no requieren tanto control durante su manufactura.

Estas ventajas se han traducido en la idea de usar materiales vítreos, como los semiconductores amorfos, en la construcción de circuitos para computadoras y celdas solares mucho más baratas. Hoy en día, se acepta que el concepto más importante que ha surgido en este campo es la idea de que las propiedades electrónicas están controladas por centros o regiones activas del material ocupadas por átomos en niveles de energía poco usuales. En otras palabras, la clave del entendimiento radica en la naturaleza de los enlaces de la red, a diferencia de los materiales periódicos.

El entendimiento teórico de los mecanismos que operan en los materiales desordenados ha producido un importante impacto en las aplicaciones tecnológicas,

aunque la razón de su existencia como materiales aún no ha sido comprendida cabalmente⁽²³⁾.

2.1.1 ¿QUÉ SON LOS MATERIALES AMORFOS?

Lo más importante de este tipo de materiales se puede resumir en dos cosas:

1. ASPECTO CIENTÍFICO DEL MATERIAL: Una gran diversidad de materiales pueden ser reconocidos como amorfos. El nombre de “amorfos” se asocia a una característica exclusiva del mundo de los vidrios, por eso suelen llamar a los materiales amorfos como vidrios.
2. FUNDAMENTO FÍSICO DE ESTOS MATERIALES: Es decir, sus propiedades físicas. Por ejemplo, su banda energética, sus propiedades mecánicas, eléctricas y magnéticas. Características que son únicas de ellos y no son claras en los sólidos cristalinos.

Los materiales amorfos son sustancias que al ser sometidas a pruebas experimentales, ponen de manifiesto: su resistencia a la fluencia, característica del estado cristalino (sin presentar una tendencia a asumir la forma geométrica de los cristales ya que presentan poca o ninguna organización estructural).

Sus moléculas están evidentemente distribuidas al azar y las propiedades físicas del sólido son idénticas en todas direcciones (isótropo). Ocasionalmente estas sustancias evidencian las propiedades elásticas de los cristales, por ejemplo en una escala considerable su expansión puede ser proporcional a la tensión aplicada. Cuando se les calienta, tales sustancias no evidencian un punto de fusión, aunque se

ablanden progresivamente, aumentando con relativa rapidez la tendencia a una deformación permanente bajo carga ⁽²⁴⁾.

2.2 VIDRIOS METÁLICOS

Las aleaciones metálicas amorfas son aleaciones y metales sin un orden atómico de largo alcance. También se les conoce como aleaciones no cristalinas. Hay indicadores estructurales claros e indicadores por sus muchas propiedades de que en el vecino más próximo, o local, no existe un orden en la mayoría de las aleaciones metálicas amorfas, sino un rango de desorden atómico.

Al sobreenfriar aleaciones sólidas, el propósito es cruzar los límites de fase lo suficientemente rápido para prevenir totalmente, o al menos parcialmente, las reacciones de equilibrio que toman lugar. Al sobreenfriar desde el estado líquido los límites de fase críticos en el diagrama de fase son líquidos y sólidos. Debido a que la movilidad atómica en un líquido es mucho más grande que en un sólido, las velocidades de enfriamiento que se requieren para influenciar la cristalización de una aleación, obviamente son mucho más grandes que aquéllas requeridas para prevenir un cambio de fase en el estado sólido. Como resultado, las técnicas convencionales para sobreenfriar un sólido no conlleva a ningún resultado significativo cuando se aplica a una aleación líquida. Se han desarrollado técnicas muy simples que se basan en enfriamiento por conducción del líquido en un sustrato sólido o líquido (agua fría para el caso de fabricación de alambres) donde la cristalización de aleaciones líquidas, se puede modificar y en algunos casos se pueden suprimir completamente.

Cuando una aleación puede ser enfriada desde el estado líquido o gaseoso, de tal forma que se suprime totalmente la cristalización, se le conoce como vidrio metálico, aleación amorfa o metal amorfo ⁽²⁵⁾.

2. 2.1 ESTRUCTURA DE LOS MATERIALES AMORFOS

La estructura de un material amorfo ha sido mucho tiempo un misterio. Desde Dixmier et al ⁽²⁶⁾, primero calculando la función de la distribución radial (R.D.F.) desde las medidas de intensidad de rayos X en la aleación amorfa Ni-P, muchas determinaciones estructurales han sido realizadas por el análisis de rayos X. Recientemente, también se han usado microscopía de transmisión electrónica de alta definición, microscopía de ión de campo, medidas de Mössbauer y medida de absorción de positron como herramientas para resolver este problema. Estos estudios revelaron que las estructuras amorfas se caracterizan por (1) una estructura homogénea en lugar de por límites interiores que separan las regiones pequeñas, y (2) un arreglo atómico aleatorio donde el orden es de corto alcance y está menos a de 15 ± 1 Å. Particularmente, la intensidad de la curva de difracción de rayos X se caracteriza por una cresta principal ancha que es menos afilada y más intensa como si fuera de un líquido, y tres o cuatro subcrestas muy débiles. Es más, se observa a menudo que la curva de intensidad de rayos X de algunas aleaciones amorfas tiene un hombro en la segunda cresta.

Para intentar describir una estructura amorfa, generalmente, se han preparado tres modelos hasta ahora: modelo cristalino, modelo de celosía de capa aleatorio y el modelo Bernal un modelo de empaquetamiento denso aleatorio.

En el caso del modelo cristalino, se asume una estructura cristalina con un tamaño pequeño para una muestra en particular y se calcula directamente en función de la

interferencia $i(k)$ con la ecuación de Debye. Cargill calculó la función de la interferencia para fcc, hcp, y Ni_3P tipos de cristales de tamaño pequeño para comparar éstos a los resultados experimentales obtenidos en las aleaciones amorfas de Ni-P. Cargill encontró que estos modelos no coincidían completamente con las observaciones experimentales aún cuando se tomaron en cuenta las fallas por apilamiento y esfuerzos internos. Sin embargo, una película delgada amorfa, Ag-Cu, mostró coincidencia razonable con un modelo fcc, indicando que estas películas eran microcristalinas. Otro modelo cristalino era el acercamiento a cuasicristal. Este modelo empieza con las distancias atómicas entre los átomos y ocupación numérica de una estructura cristalina propuesta, y se asume una distribución de la función Gaussiana para cada cuerpo a considerar para el desplazamiento desordenando alrededor del centro del cuerpo. Maitrepierre calculó la función de la distribución radial (R.D.F.) para determinar la estructura de Ni-Pd-P y Fe-Pd-P aleaciones amorfas que usan este modelo. Maitrepierre concluyó que en la estructura del Pd_3P (Pd-rico) la estructura con las observaciones experimentales era satisfactoria.

El modelo de celosía de capa aleatorio fue usada por Dixmier et al ⁽²⁶⁾, para investigar las aleaciones amorfas Ni-P. La función de la interferencia calculada coincidió con sus resultados experimentales. Así, ellos concluyeron que la estructura de la aleación amorfa Ni-P consiste en capas hechas al azar condensadas-cerradas con las dimensiones finitas. Sin embargo, este modelo fue criticado por Cargill que calculó la función de la interferencia que tiene en cuenta además del (h, k) – tipo de reflexión considerada por Dixmier et al ⁽²⁶⁾, la reflexión $(00l)$. Él demostró que el espacio entre r_1 de las capas necesario para reproducirse en la posición de la primera cresta función de la interferencia de experimental ($r_1 = 2.03 \text{ \AA}$) es mucho más pequeño que el diámetro atómico de un átomo de níquel en níquel cristalino (2.49 \AA). Esto implicó que estas capas condensadas no eran completamente el azar como en el carbono negro donde r_1 es mayor que el espacio entre los átomos.

Finalmente, Bernal ha usado el empaquetamiento denso aleatorio de esferas rígidas (D.R.P.) para investigar la estructura amorfa. Bernal substancialmente simuló un

líquido monoatómico simple que usa empaquetamiento denso aleatorio de esferas rígidas. Esto consistió en sólo cinco tipos de agujeros de las unidades básicas (Fig. 2.1) que se combinó de una manera ilimitada. En la Figura 2.1 los agujeros a, b, c, d y e hacen un 86.2, 5.9, 3.8., 0.5, y 3.7%, respectivamente, de los agujeros presentes totales en el material en el modelo D.R.P. Se determinó que la densidad de empaquetamiento ρ_p , era de 0.6366 ± 0.0004 , donde ρ_p se expresa como:

$$\rho_p = (4/3) \pi r^3 / V$$

Donde r denota el radio de la esfera rígida y V el volumen de la esfera en la estructura completa ⁽²⁷⁾.

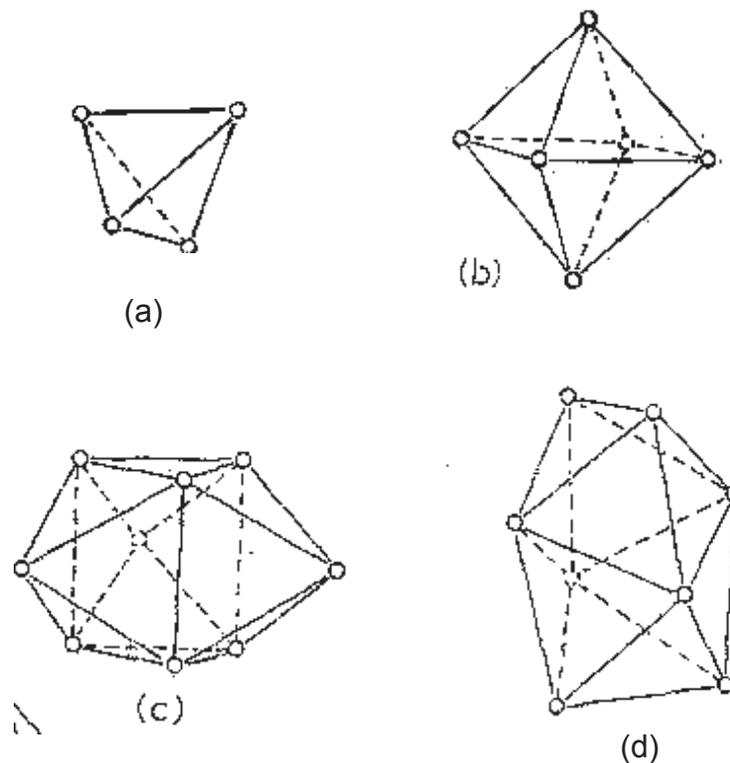


Figura 2.1.- Agujeros básicos que constituyen el modelo de Bernal de estructura DRP: (a) tetraedro; (b) octaedro; (c) prisma trigonal; (d) tetragonal dodecaedro ⁽²⁷⁾.

2.2.2 APLICACIONES POTENCIALES DE LOS VIDRIOS METÁLICOS

A continuación se describen aplicaciones de algunos vidrios metálicos reportados por Raskin y Smith ⁽²⁵⁾.

El interés mundial por los metales amorfos se ha sostenido en gran medida por los claros beneficios vistos en el uso de dichos materiales en un gran número de áreas de aplicación. En el presente, la escala de inversión para la producción y desarrollo de aplicación ha excedido las investigaciones de laboratorio dentro de una clase de materiales; la presente inversión se atribuye directamente a una apreciación mundial por la conservación de energía y uso potencial de los vidrios metálicos.

Se debe notar que en una sustitución completa de vidrios metálicos ferromagnéticos por aceros eléctricos convencionales en una aplicación simple (corazón de transformadores para utilería de distribución eléctrico) tiene el potencial de ahorrar dos tercios de más de 3×10^{10} kW de energía eléctrica anualmente desperdiciados en esos corazones solamente en los Estado Unidos.

Por otro lado, una variedad de aparatos basados en metales amorfos se han fabricado, tales como transductores, cabezas para cintas magnéticas de grabación y alarmas de seguridad.

2.2.3 APLICACIONES MECÁNICAS

a) Aleación de unión (*brazing filler materials*)

Unión de metales para alta temperatura y alta resistencia se producen generalmente con aleación de unión (*brazing*), los cuales usan laminillas de composiciones eutécticas para que fluyan dentro de la unión a una temperatura tan baja como sea

posible. Tales composiciones cristalinas son generalmente laminillas de metal noble. Sin embargo, puesto que esas composiciones están cerca o en eutécticos, son formadores potenciales de vidrio, cuando se fabrican por la tecnología de enfriamiento extremadamente rápido. La cinta metálica amorfa de unión es fuerte y flexible, conformándose muy bien en superficies curvas y dando una unión óptima y controlada. Debido a que los vidrios metálicos no contienen aglomerantes, son 100% densos, no son contaminantes y tiene una duración prolongada. Además, las laminillas cristalinas base metal noble están siendo remplazadas por composiciones amorfas con elementos relativamente baratos (por ejemplo, el remplazamiento de laminillas base oro por una aleación amorfa base níquel), en aplicaciones donde se puede tolerar la alta temperatura de unión de la laminilla base níquel (1148° C comparados con los 996° C para el oro).

El hecho de que las laminillas amorfas se cristalicen durante la unión no es detrimental, ya que en realidad la aleación se está combinando con los materiales de unión durante el proceso. Pruebas comparativas de resistencia de unión han mostrado que las laminillas de los metales amorfos dan uniones superiores.

Debido a sus altas resistencias y por su forma isotrópica bidimensional, los metales amorfos prometen ser usados como compuestos planos. De hecho, se han fabricado platos de alta calidad de listones METGLAS 2826MB de media pulgada a través de 0° a 90° con una matriz epóxica. Estos especímenes han mostrado un grado remarcable en isotropía en plano y resistencia.

Por otro lado, el uso de alambres amorfos como reforzamiento de llantas ha tenido un uso potencial, principalmente en llantas para camión de carga pesada.

Fibras de cintas metálicas amorfas se han evaluado en reforzamiento de concreto. En esa aplicación, las superficies de fibras METGLAS2826MB se corrugaron con el bombardeo de arena para mejorar la adhesión al mortero y se notó un

comportamiento superior de refuerzo, se notó que hubo un incremento en el trabajo específico a la fractura de 2000 veces, al adicionar únicamente el 1% de fracción de volumen de la fibra.

b) Transductores

Los transformadores de poder que utilizan corazones con metal amorfo son estables acústicamente debido a que la ausencia de anisotropía cristalina permite al marcador del corazón recocer un patrón de dominio longitudinal. Bajo esas circunstancias no hay rotaciones de dominio durante la excitación del corazón, por lo tanto no hay magnetostricción.

c) Componentes para comunicaciones de alta fidelidad

Cabezas para grabar/tocar en sistemas de audio de cintas magnéticas han estado a la venta por al menos tres compañías en Japón (TDK, Matsushita y Sony). Además, se han reportado aleaciones amorfas adecuadas para cabezas de video. Las características de los vidrios metálicos en esta aplicación son la alta saturación de inducción, alta permeabilidad magnética, baja remanencia y alta dureza de superficie (para resistencia a la abrasión).

d) Sistemas de seguridad

La alta permeabilidad magnética de los metales amorfos ferromagnéticos los hace buenos generadores de sonidos cuando se colocan en campos adecuados AC y DC. Esta característica los hace útiles como alarmas antirrobo para proteger mercancías de tiendas.

2.2.4 PROCESOS PARA OBTENER ALEACIONES METÁLICAS AMORFAS

La mayoría de los vidrios metálicos, se producen a velocidades de enfriamiento relativamente altas 10^5 Ks^{-1} o mayores. Las velocidades altas de enfriamiento se logran por esparcir una capa delgada de líquido en buen contacto con un substrato altamente conductivo, por ejemplo metales zafiro. La velocidad de enfriamiento se determina por la transferencia de calor líquido-substrato y su espesor, así como por la conductividad térmica de la capa líquida.

El espesor de los vidrios metálicos se limita a pocos milímetros. Alternativamente, se pueden formar sólidos amorfos sin tocar el estado líquido completamente. Los procesos, conocidos como depositación atómica (o molecular), envuelven crecimiento desde la fase gaseosa por evaporación térmica, bombardeo, o descomposición de compuestos gaseosos por descargas de radio frecuencia. Dichas técnicas dan altas velocidades de enfriamiento eficientes conllevando a sólidos amorfos los cuales no se pueden obtener como vidrio por enfriamiento desde el líquido ⁽²⁸⁾. Además de estas técnicas existen varias más, las cuales se presentan en la Figura 2.2:

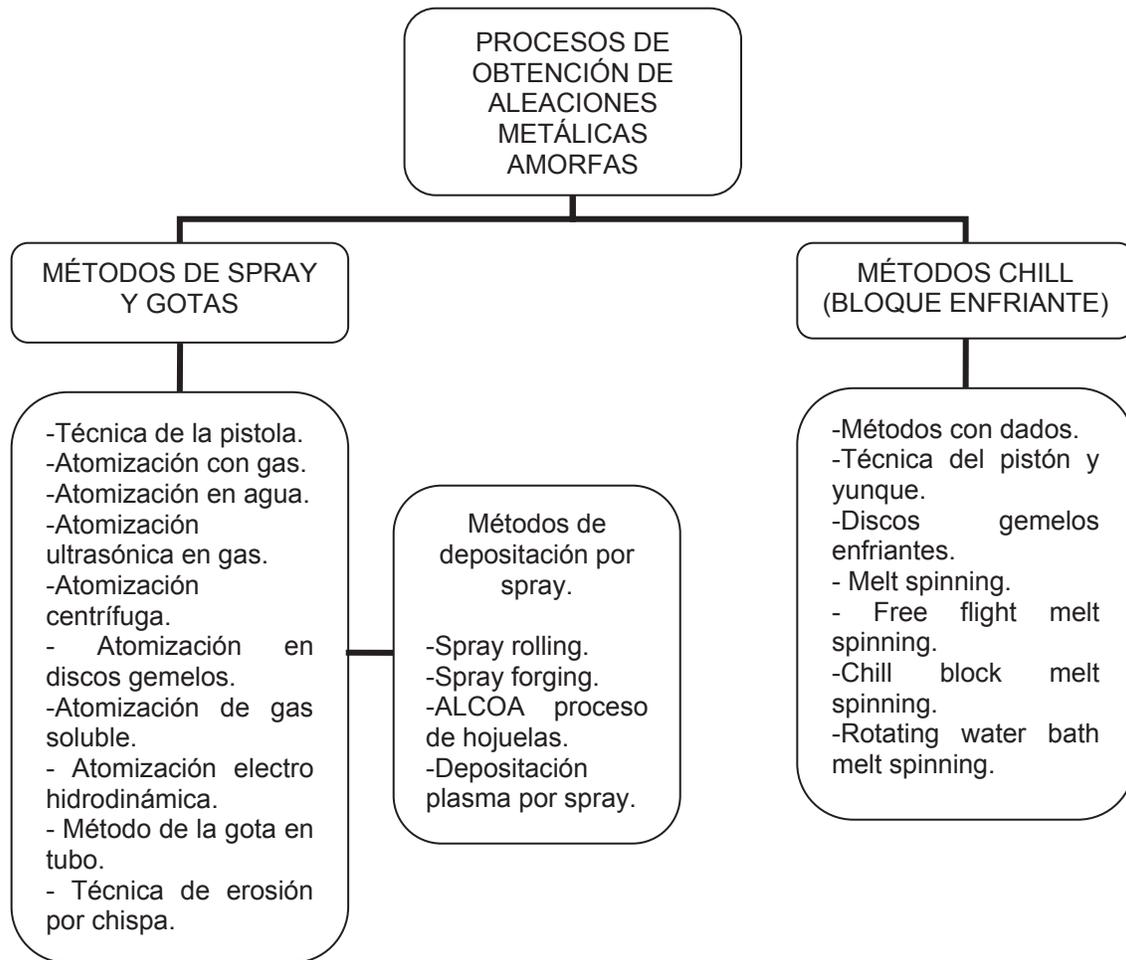


Figura 2.2 Diagrama de los procesos de obtención de las aleaciones metálicas amorfas ⁽²⁸⁾.

Los métodos Chill (bloque enfriante) incluyen la inyección de la fusión en un dado, formando una sección delgada por forja entre un martillo o pistón y un yunque, extruyendo la fusión sobre una superficie fría o la extracción de la fusión por contacto con un disco rotatorio.

En los métodos de Spray y Gotas, una corriente de metal líquido se atomiza, por ejemplo; rompiendo en gotas finas por medio de un gas o un líquido. El mecanismo

para lograr la atomización y los medios para enfriar pueden ser diferentes en las diferentes técnicas.

2.2.5 RESISTENCIA A LA CORROSIÓN

Desde el punto de vista de la corrosión, las aleaciones amorfas son materiales nuevos. Debido a la estructura amorfa, los vidrios metálicos están libres de defectos asociados con el estado cristalino tales como límites de grano, dislocaciones y fallas de apilamiento. Más aún, la solidificación rápida de las aleaciones líquidas para preparar aleaciones amorfas previene la difusión en el estado sólido durante la solidificación, precipitados y segregaciones. Por lo tanto, las aleaciones amorfas son referidas como aleaciones ideales químicamente homogéneas. Ya que los metales cristalinos ordinarios a menudo sufren corrosión localizada debido a la presencia de sitios químicos heterogéneos en la superficie del metal, las aleaciones amorfas químicamente homogéneas, serían resistentes al ataque de corrosión localizada ⁽²⁹⁾.

En general, la resistencia a la corrosión de casi todos los materiales metálicos se determina por la composición, estabilidad y uniformidad de la superficie formada así como por la cinética de formación. Las aleaciones amorfas metal-metaloide pueden ser altamente resistentes a la corrosión con una película pasiva protectora conteniendo una alta concentración de especies benéficas con alta estabilidad. Cuando las aleaciones amorfas poseen tales características, la resistencia a la corrosión dependerá de la uniformidad de la película pasiva formada, puesto que en los metales cristalinos y algunas aleaciones amorfas generalmente contienen puntos débiles cuya actividad es responsable de la densidad de corriente pasiva en soluciones agresivas. En este sentido, la naturaleza homogénea de las aleaciones amorfas es la responsable de su gran habilidad de pasivación y su gran resistencia contra picaduras. A menudo los defectos cristalinos son químicamente heterogéneos y tienden a actuar como sitios de inicio de corrosión. Además, la solidificación rápida

del líquido previene difusión en el estado sólido durante el enfriamiento y evita la segregación, precipitación y formación de otras fluctuaciones de composición. Por lo tanto se considera que las aleaciones amorfas son aleaciones ideales que son químicamente homogéneas y de fase simple, lo cual da una alta resistencia a la corrosión.

La heterogeneidad química en aleaciones amorfas cristalizadas conlleva a una alta densidad de puntos débiles en la película pasiva y a un ataque corrosivo localizado. Tratamientos térmicos en aleaciones amorfas conlleva a la formación de fases metastables cristalinas en la matriz amorfa antes de la formación de fases estables cristalinas.

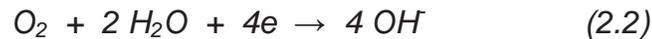
Se considera que los límites de grano actúan como sitios de superficies activas con respecto a la corrosión. La densidad de límites de grano en aleaciones cristalinas enfriadas rápidamente es significativamente mayor que las aleaciones cristalinas convencionales. No obstante, las aleaciones enfriadas rápidamente poseen una resistencia a la corrosión considerablemente mayores que las aleaciones cristalinas convencionales con el mismo promedio de composición.

Las aleaciones enfriadas rápidamente de fase simple muestran una resistencia a la corrosión considerablemente mayor que los aceros inoxidable cristalinos, aún si las aleaciones enfriadas rápidamente son cristalinas. Si la fase cristalina que se forma en la matriz amorfa no es diferente de la matriz amorfa en términos de la composición promedio, tratamientos térmicos disminuyen considerablemente la resistencia a la corrosión. Los defectos cristalinos, tales como límites de grano, formados durante la solidificación rápida pueden estar limpios químicamente y pueden no actuar como sitios activos preferenciales en la superficie con respecto a la corrosión. En contraste, el tratamiento térmico induce inevitablemente la difusión en el estado sólido y por lo tanto resulta en varias fluctuaciones de composición tales como precipitaciones, segregación y otros gradientes de composición, y pueden

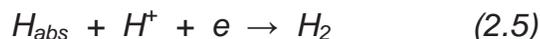
entonces actuar como sitios activos dominantes en la superficie con respecto a la corrosión.

Las aleaciones amorfas metal-metaloides que contienen Cr poseen resistencia a la propagación de corrosión por picaduras y grietas debido a una alta habilidad de pasivación proveniente principalmente de la alta reactividad de las aleaciones conteniendo metaloides, lo cual resulta en una formación rápida de una película delgada e impermeable de óxido de cromo ⁽²⁹⁾.

Algunas aleaciones amorfas sufren fragilización por hidrógeno cuando se corroen bajo la aplicación de un esfuerzo de tensión o cuando se carga H en ellas ⁽³⁰⁻³²⁾. Cuando una muestra metálica es corroída por inmersión en una solución acuosa, toman lugar las siguientes reacciones catódicas:



La suma de las velocidades de estas reacciones catódicas es igual a la velocidad de corrosión del metal. La reacción (2.1) consiste de las siguientes reacciones elementales:



De lo anterior, la corrosión del metal resulta en la formación de átomos de hidrógeno absorbidos en la superficie del metal, siendo H_{abs} especies intermedias de la reacción catódica. Algo del H absorbido es entonces absorbido en el metal como:



Consecuentemente, la corrosión acuosa conlleva a la absorción de H en el metal y a menudo a la fragilización por hidrógeno.

Los tipos de las especies de metaloides contenidas en las aleaciones afectan significativamente la susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno

2.3 ACEROS INOXIDABLES

Por acero se entiende hoy todo hierro maleable conseguido por vía líquida. El contenido en carbono puede variar entre 0.02 y 1.6%. Las materias primas más importantes para la fabricación del acero son: hierro, hierro esponja y chatarra de hierro. En la fusión del hierro en acero, se oxidan en gran parte sus carbonos de silicio y manganeso, y, en ciertos casos también fósforo. La oxidación puede hacerse por aire o por gas de oxígeno o por oxígeno procedente del mineral de hierro.

Según la alimentación de los hornos y los componentes de las escorias, se distingue entre procesos ácidos y básicos. En los hornos ácidos se introduce cuarzo machacado (SiO_2) o arena, y las escorias tienen que ser muy ácidas, o sea, han de tener un alto contenido en ácido silícico procedente de la oxidación del silicio del hierro. En los hornos básicos se introduce dolomita quemada o magnesita y las

escorias deben tener un alto contenido de cal, que procede de una adición de piedra caliza o de cal quemada.

En los hornos ácidos no es posible librarse del fósforo o del azufre y, por tanto, se necesitan minerales puros. En cambio, en los hornos básicos se pueden quitar grandes cantidades de fósforo e incluso se puede aminorar algo el contenido en azufre, así que se pueden trabajar minerales impuros y más baratos. Los procedimientos básicos convienen, pues para fabricar hierro comercial corriente. El acero acabado se obtiene a unos 1600° C. Se suele verter en moldes verticales y en grandes bloques, lingotes, que después son laminados o forjados en productos finales. Objetos largos y delgados pueden fundirse de forma ininterrumpida. Para esto se emplea un molde de cobre, refrigerado por agua y abierto en su fondo, de modo que lo fundido puede salir sin interrupción. Una parte del acero se funde directamente en moldes de arena para fabricar diversos objetos ⁽³³⁾.

2.3.1 PROPIEDADES DEL ACERO

El acero es resistente, duro, elástico y resistente al calor. Estas propiedades pueden ser modificadas de distintas maneras por tratamiento térmico o por aleación con distintas sustancias. Un inconveniente es su menor resistencia al oxígeno del aire y al agua. El hierro, componente principal del acero, es el metal más barato de todos.

El acero al carbono contiene siempre pequeñas cantidades de carbono, silicio y manganeso, con fósforo y azufre, que son impurezas indeseables. El contenido en carbono determina las propiedades principales del acero como dureza, resistencia y capacidad de ser templado. Para ciertos objetos se emplean aceros aleados.

Si se lija y pule una probeta de acero sumergiéndola después en un ácido, resulta visible la estructura del acero, que puede ser estudiada bajo un microscopio.

Entonces se ve que el acero está constituido por granos claramente delimitados, en los cuales se pueden notar los diversos componentes de la estructura.

Las diferentes estructuras del acero son: ferrita, cementita, perlita, austenita, martensita.

Los componentes menores (silicio, manganeso y fósforo) están disueltos en los otros componentes a todas las temperaturas, y no aparecen por tanto en la estructura; en cambio, el azufre se distingue en forma de sulfuro de manganeso (escorias). Normalmente el azufre es contenido en proporción tan baja que no tiene importancia.

Los aceros inoxidable no se oxidan en la atmósfera como la mayoría de los otros aceros. El término *inoxidable* implica una resistencia a mancharse, oxidarse por picaduras por aire, humedad y contaminación, generalmente se define con un contenido de cromo de más del 11% pero menos del 30%.

Con las restricciones específicas en ciertos tipos, los aceros inoxidable pueden formarse y pueden fabricarse de manera convencional. El acero inoxidable puede formarse más allá del mecanizado y puede unirse por medio de soldering, brazing y soldadura. Puede usarse como revestimiento íntegro en aceros de baja aleación.

Los aceros inoxidable AISI L contiene 0.03% carbono máximo para reducir la sensibilización en las soldaduras o durante los ensayos de tensión. La calidad del extra bajo carbono tiene como precedencia los aceros estabilizados ⁽³⁴⁾.

El acero del tipo 316L es una modificación de bajo carbono del tipo 316 usado en aplicaciones que requieren la soldadura. El bajo contenido de carbono minimiza la precipitación del carburo en la zona del calor cerca de las soldaduras que pueden llevar a la corrosión intergranular en ciertos ambientes ⁽³⁵⁾.

2.3.2 RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES

Los aceros inoxidable austeníticos están usándose en cantidades crecientes como materiales arquitectónicos debido a su durabilidad y a su superficie casi sin mantenimiento. La resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable es adecuada para todos los tipos de aplicaciones al aire libre. El acero inoxidable puede tener varios acabados como cepillados, pulidos y templados luminosos ⁽³⁴⁾.

Tal como el nombre lo indica, los aceros inoxidable son más resistentes a la corrosión y a las manchas que los aceros al carbono y de baja aleación. Este tipo de resistencia superior a la corrosión se produce por el agregado del elemento cromo a las aleaciones de hierro y carbono.

La mínima cantidad de cromo necesaria para conferir esta resistencia superior a la corrosión depende de los agentes de corrosión. El Instituto Norteamericano de Hierro y Acero ha elegido el 10% de cromo como la línea divisoria entre aceros aleados y aceros inoxidable, mientras que otros establecen ese límite entre el 10.5% y el 11%. La mayoría de ellos están disponibles en sus formas principales tales como planchas, barras, flejes hojas, planchuelas y tubos.

En 1912 Harry Brearley, Jefe de Laboratorio Brown-Firth Research en Inglaterra, mientras estaba intentando desarrollar aceros que fueran resistentes a la suciedad y a la corrosión que se producía en los tambores de los revólveres, informó que una composición de un 12.8% de cromo y 0.24% de carbón era muy resistente a la corrosión.

Las aleaciones austeníticas de níquel-cromo-hierro fueron desarrolladas en Alemania durante los años 1909-1912 por Benno Strauss y Edward Maurer. Los trabajos posteriores realizados por Strauss y otros más recientes condujeron a los aceros versátiles de 18 por ciento de cromo, 8% de níquel popularmente llamados 18-8 que son tan ampliamente utilizados en la actualidad ⁽³⁶⁾.

La serie 300 representa las modificaciones de composición del clásico acero inoxidable 18/8 (18% Cr-8%Ni), es un material el cual tiene una popularidad de 70 años por ser resistente a la corrosión. Entre las modificaciones más importantes de composición que mejoran la resistencia a la corrosión son: (a) la adición del molibdeno o molibdeno más el nitrógeno para mejorar la resistencia a la corrosión por picadura y hendidura, (b) el bajo contenido de carbono o la estabilización con titanio o niobio más el tantalio reduce la corrosión intergranular en los materiales soldados, (c) la suma de níquel y cromo es para mejorar la resistencia a la oxidación de alta temperatura y resistencia, y (d) la adición de níquel para mejorar la resistencia a la corrosión por tensión ⁽³⁵⁾.

La resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables es debida a una delgada película de óxido de cromo que se forma en la superficie del acero. A pesar de ser sumamente delgada esta película invisible fuertemente adherida al metal, lo protege contra los distintos tipos de corrosión, renovándose inmediatamente cuando es dañada por abrasión, corte, maquinado, etc.

2.4 UNION DE ACEROS

Desde principios de tiempo, la habilidad de unir los materiales similares o diferentes ha sido importante en la creación o fabricación de herramientas útiles, productos, o estructuras. Con el paso del tiempo la necesidad de unir no ha disminuido, de hecho ha aumentado. Se han fabricado los materiales más diversos en los componentes más sofisticados, y estos materiales se unieron de las maneras más diversas y eficaces de producir los ensambles.

En el sentido más general, *unir* es el acto o proceso de poner o reunir las cosas para formar una unidad. Mientras unir es el proceso de atar un componente o el elemento estructural a otro creando un ensamble, donde el ensamble de partes de un componente exige realizar alguna función o combinación de funciones que se necesiten o desean ⁽²¹⁾.

Un ensamble es una colección de partes manufacturadas que realizan varias funciones primarias. Estas funciones primarias pueden ser divididas ampliamente en tres categorías: estructurales, mecánicas y eléctricas. En los ensambles estructurales la función es llevar la estática o las cargas dinámicas o si es posible ambas. Los ejemplos son los edificios, puentes y las estructuras de aviones de transporte comerciales o transbordadores del espacio. En los ensambles mecánicos, aunque aparentemente estructurales, la función es crear, habilitar, o permitir algunos movimientos o serie de movimientos a través de la interacción de las partes del componente. Los ejemplos son artefactos y revestimiento de trenes. Finalmente, en los ensambles eléctricos, el propósito es crear, transmitir, o procesar algunos electromagnéticos para realizar alguna función. Los ejemplos más notables son empaques microeléctricos, pero también incluye generadores de poder y transformadores.

Idealmente una estructura se diseñaría sin las uniones, ya que las uniones generalmente son una fuente de debilidad o exceso de peso. Hay tres razones predominantes para unir materiales o partes en ensambles o estructuras: (1) para lograr la función, (2) para lograr la eficacia estructural, (3) para minimizar los costos.

Las tres opciones fundamentales para unir son: (1) la soldadura mecánica, (2) la unión por adhesión, (3) soldadura (welding). La soldadura (welding) se subdivide usualmente en Brazing y soldering.

1) Soldadura mecánica

En la soldadura mecánica, la unión de componentes o elementos estructurales en un ensamble o en una estructura se cumple a través de un componente o elemento de unión, el cual transfiere las cargas de un componente a otro sin confiar en cualquier fuerza de vinculación atómica o molecular primaria o secundaria. La unión se logra completamente a través de las fuerzas mecánicas, de cualquier interferencia física o fricción, o ambos. La interferencia física, desarrolla las fuerzas a nivel macroscópico, mientras la fricción desarrolla a nivel microscópico.

2) Unión por adhesión

Un adhesivo es un material que permite la unión entre dos superficies o sustratos en el que actúan dos fuerzas esenciales, la adhesión y la cohesión: la adhesión es la fuerza de unión que se produce entre el adhesivo y el sustrato y la cohesión es la resistencia ejercida en el interior del adhesivo.

La Adhesión depende de tres factores: mecánico (rugosidad y acabado superficial), físico (humectación del sustrato) y químico (naturaleza y afinidad que existe entre el sustrato y el adhesivo).

El adhesivo, una vez aplicado, alcanzará sus máximas propiedades tras el proceso de curado. El curado consiste en la transformación del adhesivo desde un líquido, más o menos viscoso, en un sólido. Este proceso puede durar, en función del adhesivo, desde escasos segundos a varias semanas. El curado puede consistir en una reacción de polimerización, parcial o total de adhesivo, o en la eliminación del disolvente o emulsionante, del adhesivo ya polimerizado, que lo mantenía en estado fluido. Hasta que el curado no se completa, la unión adhesiva deberá manejarse con precaución para evitar su deterioro.

La adhesión es por tanto, la suma de las fuerzas físicas y mecánicas de atracción y adsorción. La máxima adhesión se consigue cuando el adhesivo está en contacto íntimo con las zonas a unir. Este es el motivo por el que el adhesivo debe penetrar totalmente en la rugosidad superficial y mojar toda la superficie. La resistencia de la fuerza adhesiva depende del contacto intermolecular (grado de mojado) y de la capacidad adhesiva de la superficie. Para una determinada tensión superficial del adhesivo, el mojado depende de la energía superficial del sustrato, la contaminación superficial reducirá notablemente esta energía, por lo que la limpieza de las superficies a unir es fundamental para obtener una buena unión adhesiva⁽³⁷⁾.

2.4.1 PROCESO DE SOLDADURA

La *soldadura* es un proceso de unión permanente de materiales en el cual se funden las superficies de contacto de dos (o más) partes mediante la aplicación conveniente de calor, presión o ambas a la vez. La integración de las partes que se unen mediante soldadura se denomina un *ensamble soldado*. En algunos casos se agrega un material de aporte o *relleno* para facilitar la fusión. La soldadura se asocia por lo regular con partes metálicas, pero el proceso también se usa para unir plásticos⁽³⁸⁾.

Los vidrios metálicos pueden ser soldados por medio de la soldadura con una formación de unión primaria covalente, mientras que los cerámicos pueden ser unidos por medio de soldadura con una formación iónica, covalente o ambas, dependiendo en particular del cerámico que vaya a ser unido. La clave a toda soldadura es la *interdifusión* entre los materiales a ser unidos, si esa difusión ocurre en el estado líquido, sólido o ambos.

Las cantidades relativas de calor y presión necesarias para crear soldaduras varían de un extremo a otro. A calor muy alto o poco o sin presión puede producir

soldaduras confiables en la proporción alta de difusión en el estado sólido a elevadas temperaturas o en el estado líquido produciendo fusión. Poco o nada de calor con una presión alta puede producir soldaduras forzando a los átomos por deformación plástica, confiando en la difusión del estado sólido. Los procesos de soldadura involucran cantidades necesarias de calor y bastante presión para unir los elementos de la unión durante el proceso de soldadura, pero hay procesos en los cuales predomina el uso de la presión. De hecho, los procesos de soldadura son frecuentemente clasificados por las cantidades de presión o por las cantidades de calor involucradas en el proceso.

La Sociedad Norteamericana de Soldadura (American Welding Society) ha catalogado más de 50 tipos de operaciones distintas que utilizan diversos tipos o combinaciones de energía para proporcionar la energía requerida. Los procesos de soldadura se pueden dividir en dos grupos principales: a) soldadura por fusión y b) soldadura en estado sólido.

a) **Soldadura por fusión** Los procesos de *soldadura por fusión* usan calor para fundir los metales base. En muchas operaciones de soldadura por fusión, se añade un metal de aporte a la combinación fundida para facilitar el proceso de unión y aportar volumen y resistencia a la parte soldada. Una operación de soldadura por fusión en la cual no se añade un metal de aporte se denomina soldadura autógena.

b) **Soldadura en estado sólido** Los procesos de *soldadura de estado sólido* usan presión o una combinación de calor y presión. Si se usa calor, la temperatura del proceso está por debajo del punto de fusión de los metales que se van a soldar. No se utiliza un metal de aporte en estos procesos ⁽³⁸⁾.

2.4.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA SOLDADURA

Como otros procesos de unión, la soldadura ofrece varias ventajas pero tiene algunas desventajas también. La ventaja más significativa es indudablemente que la soldadura proporciona una estructura íntegra, produce uniones con una muy alta eficiencia. Otra gran ventaja es la gran variedad de procesos que se pueden usar y la variedad de materiales que se pueden soldar. Casi todos los metales y muchos polímeros, vidrios metálicos y cerámicos, así como las matrices de muchos compuestos, pueden ser soldados usando soldadura de estado sólido o por fusión, con o sin un material de aporte.

Otra ventaja de la soldadura es que se puede hacer manual, semiautomática, o completamente automática y puede hacerse muy portátil para implementarse en el campo para levantar una estructura en un lugar o para mantenimiento y reparación. Para la mayoría de las aplicaciones, soldar puede estar dentro de un costo razonable, aunque hay soldaduras muy críticas, con especificaciones y requerimientos especializados en donde el costo es elevado.

La desventaja más grande de soldar es que limita el desmontaje. A menudo sin embargo, esta permanencia es la razón para su selección de unir. Como ya se mencionó, el proceso puede ser caro si los requerimientos son altos o de uniones especiales. Desde el punto de vista de los materiales la soldadura puede degradar las propiedades del material base debido a los efectos del calor, especialmente de los procesos que dependen de la fusión. En desequilibrio de calor también provoca tensiones residuales y distorsión.

La soldadura es un proceso sumamente versátil, en el cual se ofrecen uniones excepcionales para el diseño y flexibilidad para los procesos de ingeniería.

2.4.3 SOLDADURA EN ESTADO SÓLIDO

El proceso de la soldadura en estado sólido se logra trayendo los átomos (o moléculas) de los materiales a ser unidos principalmente a los espacios de equilibrio a través de la deformación plástica debido a la aplicación de presión a las temperaturas debajo del punto fundición del material base y sin que el material de relleno se funda. A menudo algún calor se proporciona al proceso para permitir que la deformación plástica ocurra a las más bajas tensiones y acelerar la interdifusión. Mientras sean posibles otras fuentes de calor, el calentamiento mecánico es de lo más común e incluye fuentes de fricción y fuentes de presión. En la tabla 2.1 se presentan los ocho procesos de mayor importancia.

Tabla 2.1 Procesos de soldadura de presión por fuente de energía ⁽²¹⁾.

FUENTE DE ENERGÍA		
Mecánica	Química	Electrica
Soldadura en frío	Soldadura de presión con oxiacetileno	Soldadura de puntos
Soldadura por fricción	Soldadura por presión exotérmica	Soldadura de costura
Soldadura por vibración	Soldadura por fragua	Soldadura de proyección
Soldadura ultrasónica		Soldadura al tope
Soldadura por fragua /		Soldadura de flash
Soldadura de rollo		
Unión por difusión		Soldadura de golpe
Soldadura por explosión		

Como se muestra en la tabla anterior los ocho procesos mayores que sueldan son: (1) la soldadura fría; (2) la soldadura de la forja; (3) la soldadura de presión caliente; (4) la soldadura del rollo; (5) la soldadura de la explosión; (6) la soldadura de fricción; (7) la soldadura ultrasónica; y (8) la soldadura de difusión. La soldadura fría, soldadura de la forja, soldadura de presión caliente, soldadura del rollo y explosión que sueldan todos dependen de la presión sustancial para causar la deformación plástica (macroscópico) para producir una soldadura. La fricción y la soldadura ultrasónica dependen de la fricción que se causa al calentar y reunir átomos o moléculas por la deformación plástica microscópica y así producir una soldadura. La unión por difusión se basa en calentar tanto el material base como el de unión para acelerar la difusión y así producir soldaduras a través del transporte de masa en el estado sólido. La presión puede jugar un papel menor.

La soldadura en estado sólido, en general, ofrece varias ventajas encima de los procesos de fusión. La ausencia general de fundir y, típicamente, el calor involucrando rompe la microestructura de los materiales a unirse. Evitando la necesidad de fundir, el intermezclado de los materiales involucrados en las juntas es mínimo, para que puedan unirse a menudo materiales de composiciones disímiles. La junta que es el resultado del proceso de soldadura en estado sólido que tiene una eficacia bastante alta. Las desventajas del proceso relacionan a la preparación de la superficie y el trabajo con herramienta exigen producir las juntas aceptables y la otra desventaja son las dificultades asociadas con inspeccionar y reparar las juntas defectuosas.

2.4.4 TIPOS DE UNIONES

Hay cinco tipos básicos de uniones para integrar dos partes de una junta. De acuerdo con la siguiente figura 2.3 se definen del modo siguiente ⁽²¹⁾:

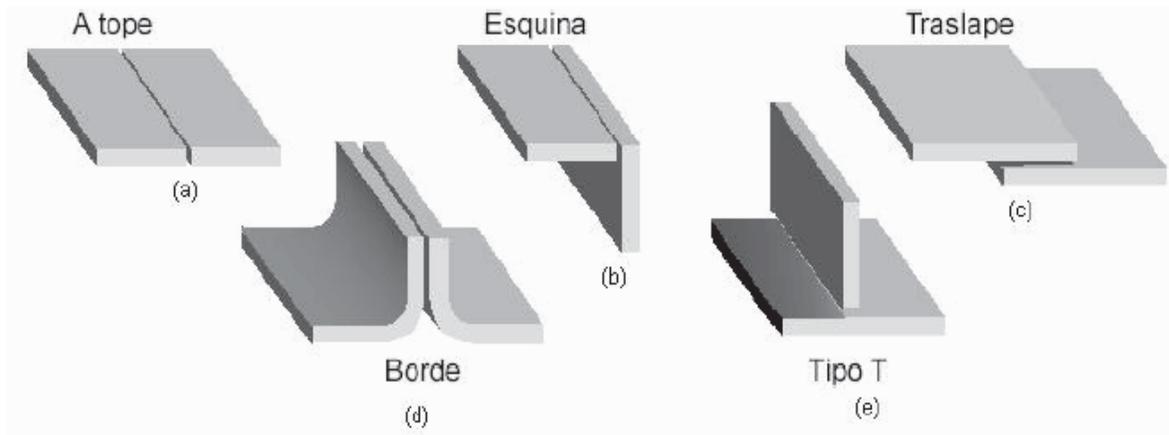


Figura 2.3 Cinco tipos básicos de uniones I: a) empalmada, b) de esquina, c) superpuesta, d) de borde y e) en T

a) *Unión empalmada*. En este tipo de unión, las partes se encuentran en el mismo plano y se unen en sus bordes.

b) *Unión de esquina*. Las partes en una unión de esquina forman un ángulo recto y se unen en la esquina del ángulo.

c) *Unión superpuesta*. Esta unión consiste en dos partes que se superponen.

d) *Unión de bordes*. Las partes en una unión de bordes están paralelas con al menos uno de sus bordes en común y la unión se hace en el borde común.

e) *Unión en T*. En la unión en T, una parte es perpendicular a la otra en una forma parecida a la letra ⁽²¹⁾.

2.5 CORROSIÓN

La corrosión es el deterioro de los metales por su interacción con el entorno. También se define como la transformación a través de reacciones químicas y electroquímicas de los materiales metálicos en sus óxidos, sales u otros compuestos. Una vez corroídos, los metales pierden resistencia, ductilidad y otras propiedades deseables. El medio corrosivo puede ser la atmósfera (rural, urbana, industrial o marina), los suelos y la mayoría de las soluciones acuosas. El efecto de la corrosión puede ser adelgazamiento generalizado de la pared metálica, la aparición de grietas, picaduras, huecos. Se puede también presentar el efecto combinado de corrosión y erosión, de la corrosión y esfuerzo mecánico, corrosión y fatiga así como la disolución selectiva de algún metal en una aleación dada. También se debe considerar el efecto de la actividad microbiológica en las etapas iniciales de la corrosión en metales expuestos a cuerpos de agua naturales. La temperatura, juega un papel muy importante en el proceso de corrosión estando acotado dicho efecto al intervalo de 273 a 373 K.

Una forma de disminuir los problemas causados por la corrosión es comprendiendo el proceso que la produce y consecuentemente previniéndola. La utilización de procedimientos de diseño y sistemas de protección adecuados garantizan equipo y estructuras de larga vida útil sin problemas.

Una causa frecuente de fallas asociadas a corrosión en componentes y estructuras es el proceso de deterioro por agrietamiento inducido por corrosión electroquímica en combinación con cargas mecánicas. Las cargas mecánicas pueden ser sostenidas o cíclicas, aplicadas o residuales. Pero todos estos tipos de corrosión se pueden prevenir desde el diseño y la construcción de los equipos con un plan que abarque una estructura bien proyectada que tienda a distribuir correctamente los esfuerzos de cada componente constitutivo, que no presente concentración de tensiones y finalmente aplicando un esquema de pintura de protección de buena calidad y espesor, contando con una adecuada preparación previa de la superficie ⁽³⁹⁾.

2.5.1 TIPOS DE CORROSIÓN

La corrosión se puede clasificar en base a diferentes aspectos como: el mecanismo por el cual ocurre, el medio en el que se desarrolla y la morfología de cómo se presenta ⁽⁴⁰⁾. De acuerdo a los mecanismos se clasifican en: Corrosión Química y Corrosión Electroquímica. En base al medio en el que se presenta se clasifica como: Corrosión en Aguas, Corrosión en Suelos, Corrosión Atmosférica, Corrosión en Medios Químicos y Corrosión Bacteriana. De acuerdo a la manifestación morfológica la corrosión se puede clasificar en generalizada o uniforme y localizada. Esta clasificación es la más utilizada y aparece de manera esquemática en la Figura 2.4.

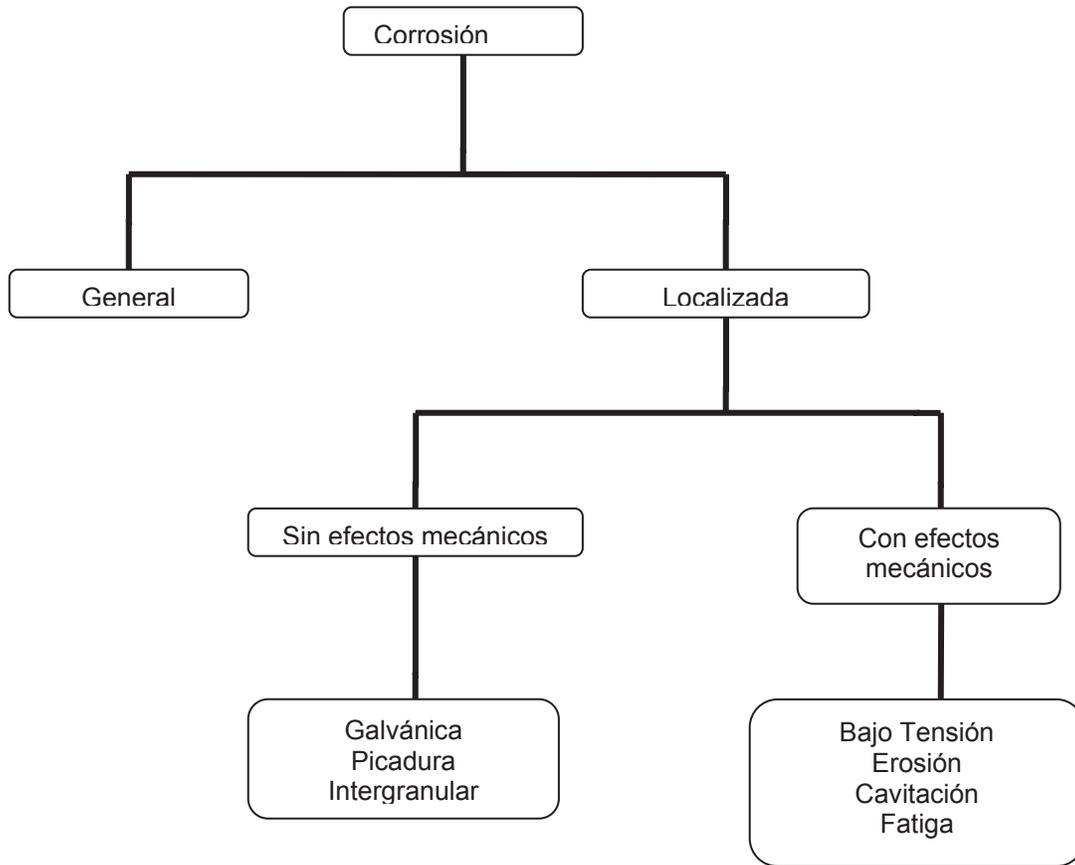


Figura 2.4 Clasificación morfológica de los diferentes tipos de corrosión ⁽⁴¹⁾.

La corrosión que ocurre en la mayoría de los medios acuosos (atmósferas, suelos, medios químicos, en presencia de bacterias), es de naturaleza electroquímica y desde el punto de vista morfológico puede adoptar cualquiera de los tipos de corrosión indicados en la Figura 2.4. A continuación se describen los tipos de corrosión que se presentan en la Figura anterior.

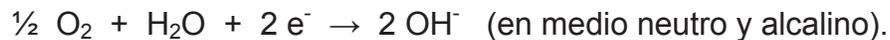
a) Corrosión electroquímica

La corrosión electroquímica se caracteriza por dos procesos dependientes y que ocurren en lugares diferentes.

Uno de tipo ANODICO, que ocurre en el lugar llamado ánodo. Es un proceso de oxidación, en que un átomo metálico (Me) sale de la red metálica, entregando electrones, transformándose en un ión metálico:



Y otro de tipo CATODICO, que ocurre en el lugar llamado cátodo y que es una reacción de reducción:



O bien:



Cada metal tiene un potencial químico particular, determinado por su estructura atómica, que le da una tendencia a atraer o perder electrones. Los metales en contacto con un electrolito forman una interfase electrificada a través de la cual se desarrolla una diferencia de potencial electroquímico. Este potencial se expresa en voltaje. La tabla de la serie galvánica de los metales ordenados en tendencia creciente para perder electrones en un electrolito específico es una manera rápida de predecir que metal tiene mayor tendencia a corroerse o como dos metales diferentes en contacto físico, e inmersos en un electrolito formarán una pila galvánica y quién de ellos ganará o perderá electrones. Cuanto más grande es la diferencia de potencial eléctrico entre dos metales, será más intensa la actividad eléctrica producida entre ellos.

b) Corrosión galvánica

La corrosión galvánica se presenta cuando dos metales diferentes (par galvánico) se hallan en contacto en un medio acuoso. La diferencia de potencial entre ellos motiva que se inicie el ataque sobre uno de los metales, a una velocidad, que dependerá esencialmente de las reacciones superficiales que ocurran sobre los dos metales ⁽⁴²⁾.

c) Corrosión por picadura

Este tipo de corrosión aparece en una forma de puntos aislados en la superficie del metal. La presentan los metales pasivos tales como los aceros inoxidable, el aluminio, por rompimiento de la película pasiva.

Causas de las picaduras:

- 1.- Inclusiones no metálicas más o menos nobles que la matriz, que provocan la formación de sitios anódicos localizados.
- 2.- Depósitos de productos de corrosión que forman celdas de aireación diferencial.
- 3.- Rompimiento de películas pasivas por iones Cl^- , Br^- , I^- , Fe^{3+} .

d) Corrosión intergranular

Consiste en una disolución preferencial del límite de grano o de una zona adyacente al mismo, de un metal o aleación.

En aceros inoxidable austeníticos la causa de la corrosión intergranular es el empobrecimiento en cromo que ocurre en el límite de grano, como resultado de la segregación de fases ricas en dicho elemento (tales como el Cr_{23}C_6). Este empobrecimiento se produce durante el calentamiento del acero en el intervalo de temperaturas entre 400 y 850°C, aunque también se han reportado casos de corrosión intergranular a temperaturas más bajas.

Durante la formación de los carburos del tipo Cr_{23}C_6 , la difusión del carbono es mucho más rápida que la del cromo por tanto el carbono se restablece fácilmente no solo en el límite de grano sino también en el centro; sin embargo, debido a su baja velocidad de difusión, el cromo durante el proceso de formación de carburos se agota en el límite y puede llegar a valores inferiores al que garantiza la inmunidad frente al ataque corrosivo (13%).

e) Agrietamiento asistido por corrosión y esfuerzo

Es un tipo de corrosión localizada que se caracteriza porque se presenta en materiales que se encuentran sometidos simultáneamente a la acción de una fuerza de tracción y a un medio electroquímico. Como consecuencia, se produce una fractura a través del metal a nivel microscópico, mientras que el resto del material permanece sin ataque. También las tensiones internas que pueden acumular los componentes estructurales de los equipos por muy diversos motivos como: gradientes térmicos elevados, una secuencia de soldadura inadecuada, o tensiones propias de los procesos de laminación, procesos de plegado con radios excesivos o fregado de enchapados sin calmados posterior, etc. Estos defectos pueden ser

atenuados realizando una adecuada secuencia de soldaduras, eligiendo el material adecuado para los electrodos de aporte, un diámetro correcto en función de los espesores a unir, un número de pasadas de cordón que asegure fusión, corrientes adecuadas.

El mismo proceso ocurre en el acero inoxidable y está es la principal razón por la que debe vigilarse permanentemente.

f) Corrosión por erosión

Aparece en presencia de gases, sustancias orgánicas, metales líquidos, líquidos o gases con sólidos en suspensión. Se presenta como agujeros direccionales en el sentido del flujo del medio y del metal se desprende en forma de iones o productos de corrosión.

g) Corrosión por cavitación

Aparece debido a la formación y condensación de burbujas de vapor en un líquido. La superficie corroída se presenta como un panel de abeja con hoyos o picaduras debido al martilleo de las burbujas de aire al explotar contra la superficie metálica.

Es típica de turbinas hidráulicas, propelas de barcos, impelentes de bombas y en regímenes turbulentos en zonas alternativas de bajas y altas presiones.

h) Corrosión bacteriana

La corrosión puede acelerarse en la mayor parte de los casos, debido a la presencia de diversos microorganismos, ya sea porque éstos sean capaces de producir compuestos, tales como protones o aniones sulfuro, o porque actúan como catalizadores dentro de las reacciones ⁽⁴³⁾. La mayoría de los organismos activos son una gran variedad de bacterias, de aproximadamente 1 – 5µm de largo, las cuales oxidan o reducen compuestos azufrados como parte de su metabolismo.

i) Corrosión por hendiduras

La corrosión por hendidura es una forma común de corrosión a la cual los metales que presentan zonas activas – pasivas son muy sensibles. Se presenta normalmente en aquellos lugares donde quedan pequeñas cantidades de electrolito, por ejemplo entre flangers, tuercas y pernos.

Este tipo de corrosión puede también ocurrir debajo de productos de corrosión y de otros productos, por lo que también se conoce por corrosión “bajo depósito” (under-deposit corrosion).

Es importante señalar que a la fecha los reportes en cuanto a la unión de aceros inoxidable, en general, unidos por la técnica de difusión en estado sólido usando cintas metálicas amorfas es poco y el que hay lo reporta una compañía comercial (Metglas ®).

Las uniones llevadas a cabo por la técnica de difusión en estado sólido que se reportan son uniones disímiles (metal/cerámico), usando como material de aporte vidrios metálicos en bulto. El acero que se ha utilizado más es el acero 304 y la aleación inconel 750.

De lo anterior surge la idea de llevar a cabo un estudio más exhaustivo referente a lo mencionado previamente y es la base de la presente tesis.

CAPÍTULO: 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se muestra la descripción de los materiales utilizados y operación de los equipos usados en la preparación de las muestras, así como las diferentes técnicas empleadas en la caracterización y evaluación de los materiales unidos.

Para la realización experimental del trabajo se siguió la metodología que aparece descrita esquemáticamente en la figura 3.1.

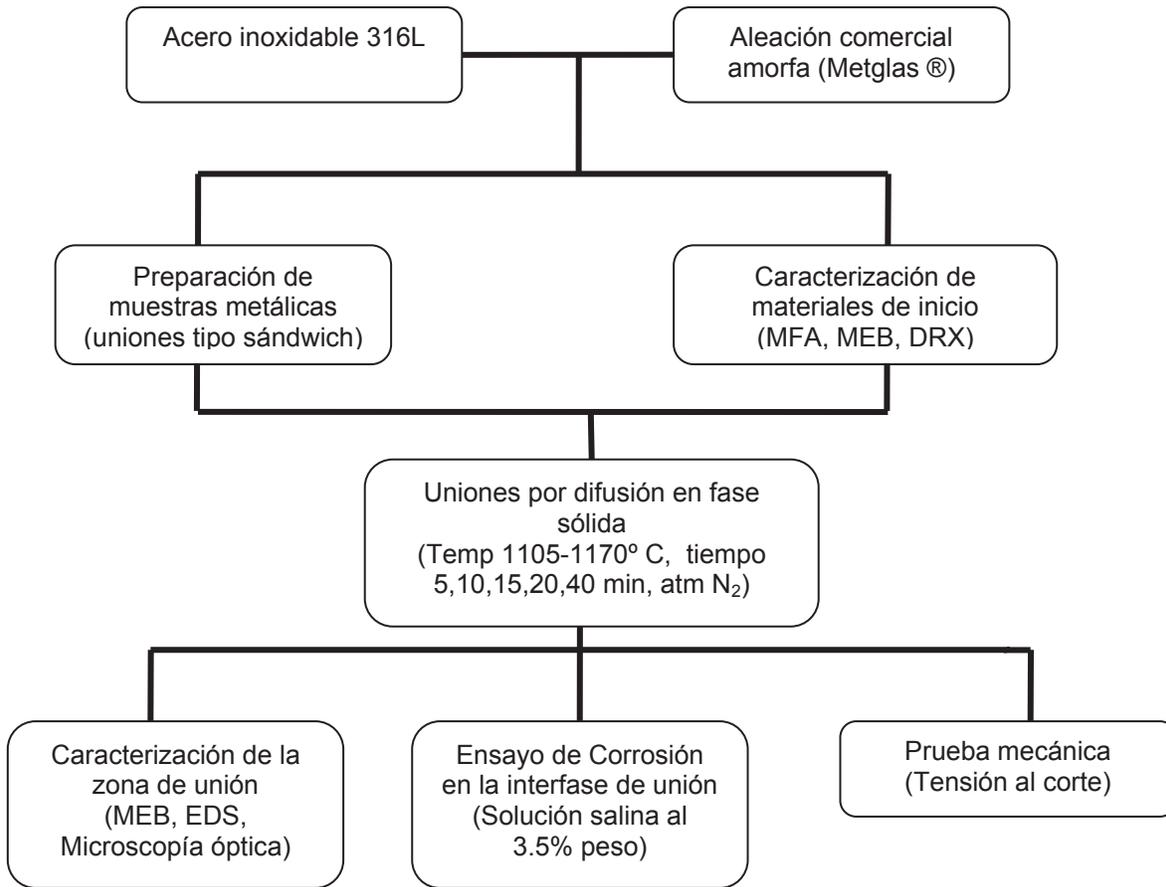


Figura 3.1 Diagrama de flujo de la ruta experimental utilizada.

A continuación se describe uno a uno los pasos de la metodología del diagrama anterior.

3. 1 MATERIALES DE INICIO

Los materiales utilizados en el presente trabajo fueron: Acero inoxidable 316L y cinta metálica amorfa (Metglas®) fabricados comercialmente, algunas características físicas y químicas de los mismos se muestran a continuación, para la cinta amorfa en las tablas 3.1 y 3.2, para el acero en la tabla 3.3 y 3.4.

Tabla 3.1 Propiedades Físicas de la cinta metálica amorfa

CINTA METÁLICA AMORFA	
Nombre del producto:	Lámina base Níquel - Metglas® MBF-15
Proveedor:	Metglas®, Inc. 440 Allied Dr. Conway, SC-29526
Apariencia:	Cinta metálica brillante
Estado físico:	Sólido
Densidad (ρ):	7.82

Tabla 3.2 Composición % peso de la cinta metálica amorfa

RANGOS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA CINTA METÁLICA AMORFA					
Composición % peso					
B	Cr	Fe	Ni	Si	Co (posible impureza)
1 – 5	10- 20	1 - 5	70 - 80	3 - 7	1 (máx.)

Tabla 3.3 Composición química del acero inoxidable 316L ⁽³⁵⁾

RANGOS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO INOXIDABLE AUSTENITICO 316L								
316 L	Composición % peso							
	Cr	Ni	C	Mn	Si	P	S	Otros (Mo)
	16-18	10-14	0.03	2.0	1.0	0.045	0.030	2-3

Tabla 3.4 Propiedades Mecánicas del Acero Inoxidable 316L ⁽³⁵⁾

PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO 316L	
Resistencia a la tracción (MPa)	517
Carga límite (0.2% offset) (MPa)	220
Elongación	50
Dureza Rockwell B	79

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES DE INICIO

Inicialmente se realizó una caracterización de los materiales adquiridos del proveedor con la finalidad de corroborar la composición química además de obtener características de cada uno de ellos.

3.2.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

La cinta metálica amorfa fue analizada con el difractómetro de rayos-x (MODELO SIMENS D5000), empleando en su operación una lámpara de cobre ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) a una aceleración de voltaje de 40 keV y una emisión de corriente de 20 mA para un rango de barrido de 10 a 90° con un tamaño de paso de 0.02° y tiempo de medida entre pasos de 0.6 segundos.

3.2.2 ANÁLISIS TÉRMICO DIFERENCIAL (DTA)

El **Análisis Térmico Diferencial (DTA)** es una técnica en la que se mide la diferencia de temperatura entre la muestra y un material de referencia (térmica, física y químicamente inerte) en función del tiempo o de la temperatura, cuando dicha muestra se somete a un ciclo de temperatura en una atmósfera controlada. En principio, se trata de una técnica cualitativa que indica la temperatura a la cual tiene lugar el cambio energético en estudio y si el proceso es endotérmico o exotérmico. Sin embargo, con un adecuado calibrado es posible convertirla en semicuantitativa y obtener información del calor involucrado en el proceso ⁽⁴⁴⁾.

La cinta metálica amorfa se sometió a la prueba de DTA para obtener la temperatura de líquido de la misma. Las características del equipo de trabajo son: TA Instruments, DSC 2910, Modulated DSC, celda DTA 1600°C, el cual tiene un programa definido y se trabaja en función de la temperatura. Este equipo se encuentra en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM.

3.2.3 EDS

El microanálisis químico en el microscopio electrónico de barrido se realiza midiendo la energía o longitud de onda y distribución de la intensidad de la señal de rayos-x generado por el haz del electrón enfocado al espécimen. Con esta técnica se obtiene la composición elemental de los materiales, se tiene un porcentaje de error relativo de 1 – 2%.

Por medio de esta técnica se realizó un microanálisis de elementos a la cinta metálica amorfa, así como al acero inoxidable 316L. Se analizó la sección transversal de las muestras unidas empleando esta técnica.

Se trabajo en dos microscopios diferentes, el microanálisis químico de la cinta metálica se llevó a cabo en un microscopio con las siguientes características: MEB: JEOL JSM-5910LV. EDS: OXFORD LINK PENTAFET. El cual se encuentra en el Instituto Tecnológico de Morelia. La prueba del acero inoxidable 316L se llevó acabo en un microscopio de características: MEB: Leica Cambridge LTD. Stereoscan 440. EDS: OXFORD LINK ISIS. Dicho microscopio se encuentra en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM.

3.3 PROCEDIMIENTO DE UNIÓN

La unión de los materiales se inicia con la preparación de las probetas. De una lámina de acero inoxidable 316L se cortaron 40 muestras de $1 \times 1 \text{ cm}^2$ y 80 muestras de $7 \times 1 \text{ cm}$. Sus superficies fueron preparadas con una lija no mayor a 600, se lavaron con agua destilada y se enjuagaron con alcohol etílico.

3.3.1 MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA (MFA)

El Microscopio de Fuerza Atómica (AFM) es un instrumento mecano-óptico. Al analizar una muestra, es capaz de registrar continuamente la altura sobre la superficie de una sonda o punta cristalina de forma piramidal. La sonda va acoplada a un listón microscópico, muy sensible al efecto de las fuerzas, de sólo unos 200 μm de longitud.

La fuerza atómica se puede detectar cuando la punta está muy próxima a la superficie de la muestra. Es posible entonces registrar la pequeña flexión del listón mediante un haz láser reflejado en su parte posterior. Un sistema auxiliar piezoeléctrico desplaza la muestra tridimensionalmente, mientras que la punta recorre ordenadamente la superficie. Todos los movimientos son controlados por una computadora ⁽⁴⁵⁾.

Un esquema generalizado del microscopio se muestra en la figura 3.2

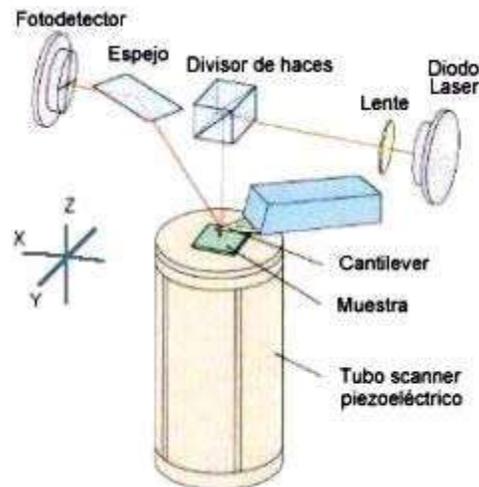


Figura 3.2 Esquema generalizado del Microscopio de Fuerza Atómica ⁽⁴⁵⁾.

Muestras de acero inoxidable 316L fueron analizadas por el microscopio de fuerzas atómicas del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM, con las siguientes características: JEOL Modelo JSPM-4210, el cual emplea puntas de silicio (NSC12), una frecuencia de resonancia de 150 KHz, una constante de fuerza de 4.5 N/m y un radio de curvatura de 10nm. La finalidad de realizar esta prueba es tener un parámetro inicial aproximado de la rugosidad de que se parte en este material.

3.4 UNIONES POR DIFUSIÓN EN FASE SÓLIDA

Se prepararon ensambles tipo sándwich, el cual consiste en dos probetas de acero inoxidable 316L del extremo de la superficie pulida, insertando entre ambas una lámina de la cinta metálica amorfa, como se muestra en la figura 3.3.

Una vez realizando el arreglo tipo sándwich, éste se colocó en un dado de grafito diseñado para mantener las superficies de los materiales a unir en contacto durante el proceso de unión, empleando nitruro de boro (BN) en las paredes del dado de grafito para evitar contaminación de carbón con la muestra, ver figura 3.4.

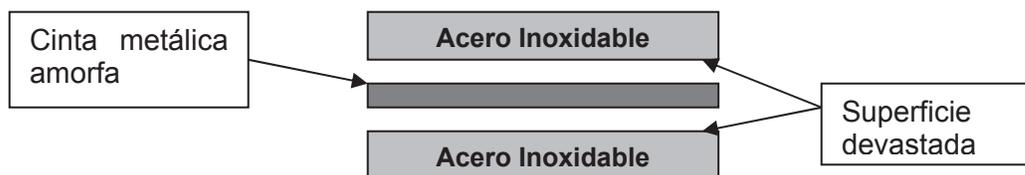


Figura 3.3 Arreglo tipo Sándwich.

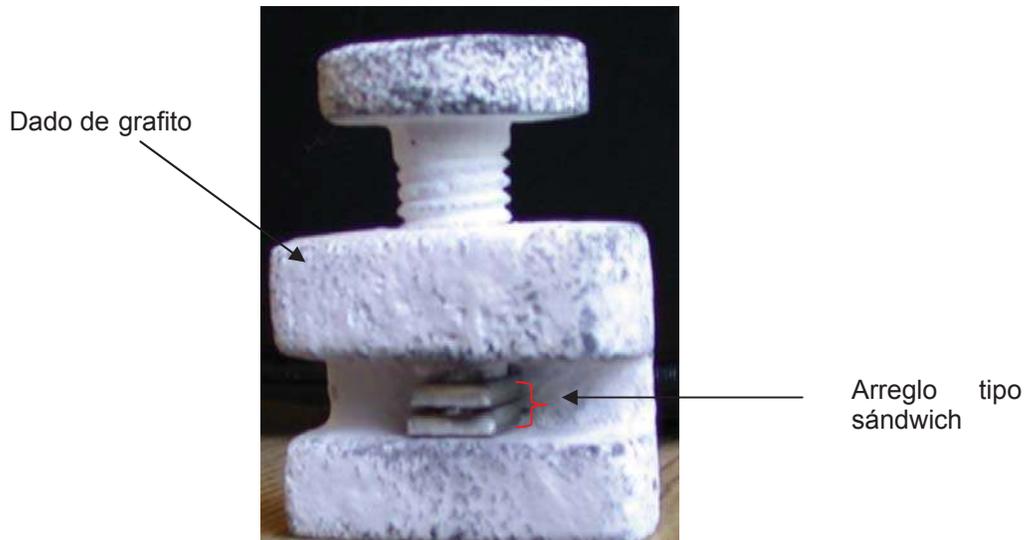


Figura 3.4 Porta muestra de grafito donde se puede observar el arreglo tipo sándwich de las muestras a unir.

3.4.1 EQUIPO EXPERIMENTAL

El equipo para los experimentos de unión se muestra en la figura 3.5, consiste básicamente de un horno marca CARBOLITE de atmósfera controlada, con cámara tubular de 8 cm de diámetro interior. Una vez preparada la muestra en el dado, se colocan dentro de la cámara del horno, al cual se le suministra un gas inerte (N_2) en forma continua durante el experimento.



Figura 3.5 Horno Tubular empleado en los experimentos de unión.

En la figura 3.6 se presenta un esquema descriptivo del horno tubular, el cual trabaja por medio de resistencias, además cuenta con un sistema de enfriamiento. Se encuentra sellado por uno de los extremos y la temperatura se controla por medio de ciclos.

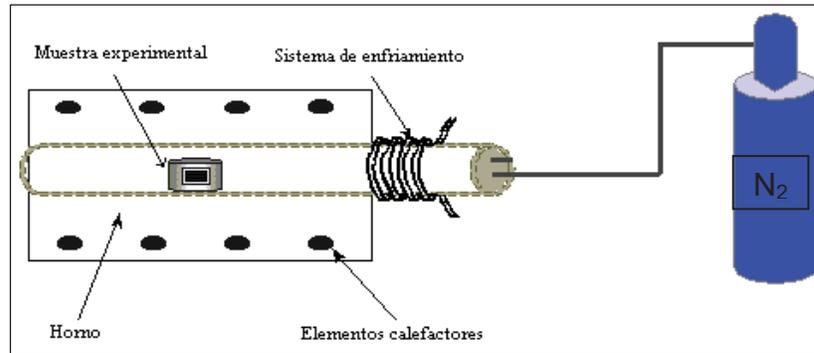


Figura 3.6 Esquema descriptivo del Horno Tubular.

Los experimentos de unión se llevaron a cabo a dos temperaturas de trabajo: 1105 y 1170° C; empleando diferentes tiempos de unión: 5, 10, 15, 20, y 40 minutos. La figura 3.7 muestra el ciclo de calentamiento seguido en la unión de las muestras, el cual consiste en programar el horno por ciclos y cada ciclo en segmentos. Se parte de la temperatura ambiente y se llega hasta la temperatura de trabajo (1105 y 1170° C), utilizando una rampa tipo R con una tasa de calentamiento de 20° C por minuto, se mantiene la temperatura constante a través de una permanencia en los diferentes tiempos de trabajo (5, 10, 15, 20 y 40 minutos), después se programa una rampa tipo R a 300 °C a una velocidad de 10° C por minuto.

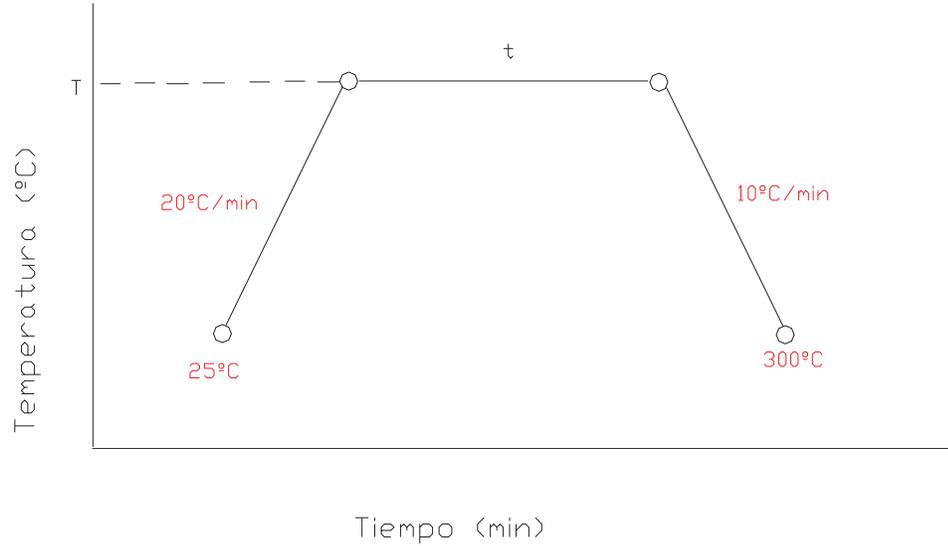


Figura 3.7 Ciclo de calentamiento.

3.5 CARACTERIZACIÓN DE UNIONES

Las uniones producidas se montan en resina y se cortan en su sección transversal utilizando una cortadora de precisión con disco de diamante de alta concentración ISOMET BUEHLER. Una vez cortadas las muestras unidas se pulieron a espejo siguiendo los siguientes pasos:

1. Se hace un pulido estándar, empezando con una lija de 400 grit, después se pasa a 600 y finalmente a 1000 grit.

2. Posteriormente se pulen con un acabado a espejo usando pasta de diamante de 6 y 3 μm , utilizando dispersante y una velocidad de 120 r.p.m.

Las muestras pulidas fueron observadas en su sección transversal con el fin de analizar la unión y las posibles interfases presentes, posteriormente fueron analizadas por microscopía electrónica de barrido. Utilizando un microscopio electrónico de barrido JEOL SCANNING MICROSCOPE MODELO JSM-6400J. El análisis químico en línea se realizó en el microscopio del Instituto de Investigaciones de Materiales de la UNAM, cuyas características ya fueron mencionadas.

3.5.1 ATAQUES QUÍMICOS

Se realizaron ataques químicos al acero para observar su estructura por microscopía óptica, se utilizó un reactivo selectivo Murakami Modificado ⁽⁴⁶⁾, para realizar este ataque se utilizó 1 parte de KMnO_4 , y 1 parte de NaOH acuoso al 8%.

El ataque selectivo se llevo acabo en el Laboratorio de Análisis Químico del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la UMSNH. Se les denomina ataques selectivos ya que revelan y distinguen las distintas fases presentes.

El tiempo de ataque y la concentración de la disolución son factores muy influyentes en el ataque químico de la superficie. En una disolución muy concentrada o durante un período de tiempo excesivamente largo, la superficie puede estropearse y no poder ser observada.

3.6 PRUEBA MECÁNICA

En ingeniería se necesita saber cómo responden los materiales a fuerzas externas como la tensión, la compresión, la torsión, la flexión. Los materiales responden a dichas fuerzas con una deformación elástica (en la que el material vuelve a su tamaño y forma originales cuando se elimina la fuerza externa), una deformación permanente o una fractura. Mientras que en los materiales unidos esto no podría ocurrir.

3.6.1 ENSAYO DE TENSIÓN AL CORTE

Para realizar las pruebas de tensión al corte en las uniones, fue necesario producir 80 probetas de 7 x 1 cm, las cuales se unieron siguiendo el mismo procedimiento ya descrito anteriormente. Estas probetas se unieron bajo el diseño de la Norma ANSI/AWS C3.2-82, conforme al apartado 1 de dicha norma.

En este apartado se dice como se debe preparar las muestras para la prueba de tensión al corte. Dicho diseño se muestra en la figura 3.8.

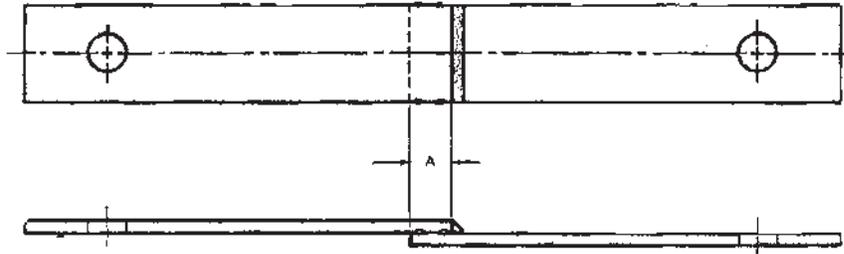


Figura 3.8 Diseño para unir las probetas para prueba de tensión al corte.

Las pruebas se realizaron en una máquina INSTRON – 5500R, MODEL 1125, en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM.

En la figura 3.9 se muestran las probetas unidas montadas en mordazas especialmente diseñadas para llevar a cabo las pruebas de tensión al corte. Dicho diseño permite que la parte unida esté en el centro de la fuerza de tensión aplicada, de tal forma que ésta se encuentra completamente vertical.



Figura 3.9 Uniones montadas en mordazas especialmente diseñadas para realizar la prueba mecánica.

Para realizar esta prueba se trabajó con una velocidad de 1 mm/seg de aplicación a la carga. En la figura 3.10 se muestra la máquina con la cual se hicieron las pruebas.



Figura 3.10 Máquina Universal INSTRON.

3.7 ENSAYOS DE CORROSION

Para llevar a cabo estas pruebas se trabajo con probetas de 1 x 1cm., unidas por el proceso ya descrito. Las probetas ya unidas se cortaron de manera transversal y se pulieron a espejo. Se les tomo microfotografías a las probetas en un microscopio óptico marca OLYMPUS PGM3 a 50x.

Después las probetas fueron inmersas en una solución salina (3.5% peso NaCl), por un período de 3 horas hasta que el potencial se estabilizó; esto es cuando los cambios de potencial de corrosión no fueron mayores de 2mV/s. El equipo donde se realizaron los ensayos es un POTENCIOSTATO/ GALVANOSTATO ACM MODEL GILLAC que se encuentra en la Universidad Autónoma de Campeche, se utilizó un electrodo de referencia de calomel saturado (SCE) y una barra de grafito como electrodo auxiliar. El cual se presenta en la figura 3.11 el equipo de trabajo.

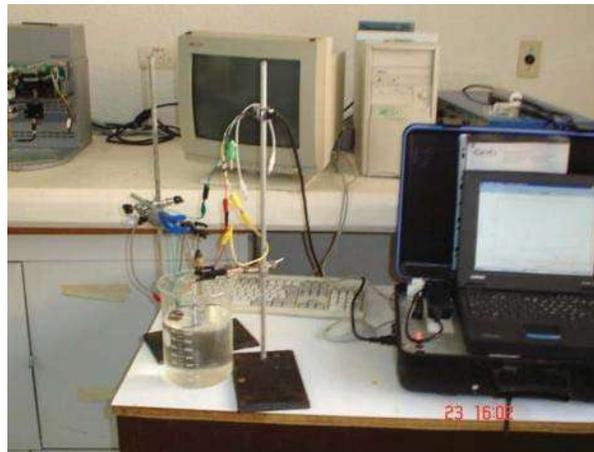


Figura 3.11 Potenciostato / Galvanostato ACM MODEL GILLAC.

CAPÍTULO: 4

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se inicia con la presentación de la caracterización de los materiales usados en el trabajo. Se presentan los resultados obtenidos en la unión mediante el proceso por difusión en fase sólida utilizando como elemento de una unión una cinta metálica amorfa base níquel, mostrando los resultados de la caracterización interfacial metal / metal. Así como los resultados obtenidos en la evaluación mecánica en las muestras unidas y el ensayo de corrosión.

4.1 MATERIALES DE INICIO

Inicialmente, a los materiales de unión se les sometió a diferentes pruebas con el propósito de conocer sus características principales. Los materiales son: acero inoxidable 316L y elemento de unión (Aleación Amorfa $\text{Ni}_{76.5}\text{Fe}_{4.2}\text{Cr}_{13}\text{B}_{2.8}\text{Si}_{4.25}$).

4.1.1 CINTA METÁLICA AMORFA ($Ni_{76.5}Fe_{4.2}Cr_{13}B_{2.8}Si_{4.5}$)

Con el propósito de comprobar los datos reportados para la cinta comercial ($Ni_{76.5}Fe_{4.2}Cr_{13}B_{2.8}Si_{4.5}$) empleada en la unión de las muestras, se realizó un análisis de rayos-x en la superficie de la cinta $Ni_{76.5}Fe_{4.2}Cr_{13}B_{2.8}Si_{4.5}$, la figura 4.1 muestra el patrón de difracción obtenido.

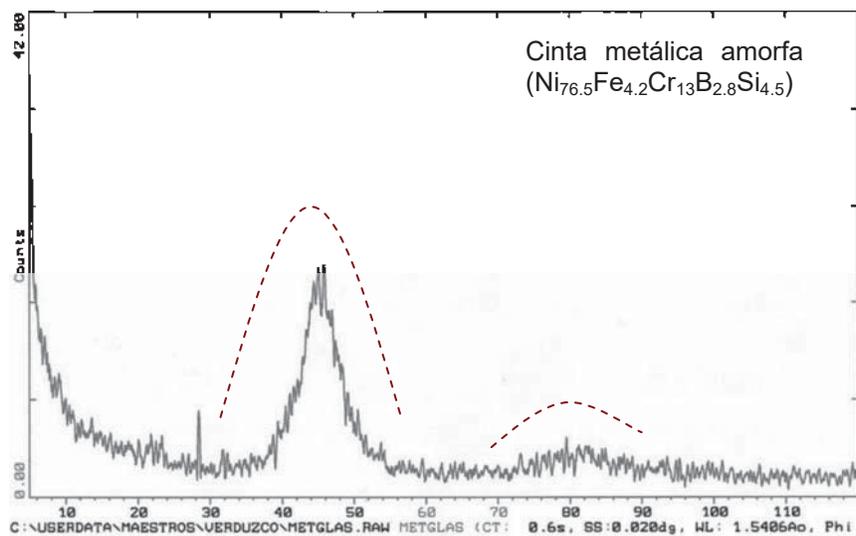


Figura 4.1 Difractograma de la cinta metálica amorfa.

Como se puede observar en la figura 4.1, por medio de esta técnica se comprueba la amorficidad de la cinta, ya que el difractograma que se obtuvo muestra una curva característica de los materiales amorfos.

Por otro lado a la cinta metálica ($\text{Ni}_{76.5}\text{Fe}_{4.2}\text{Cr}_{13}\text{B}_{2.8}\text{Si}_{4.5}$), se le hizo una prueba de análisis térmico diferencial para saber cuál es la temperatura a la cual se pueden llevar a cabo las uniones. La figura 4.2 presenta el difractograma del análisis térmico diferencial de la cinta para un rango de temperatura de 25° C a 1500° C.

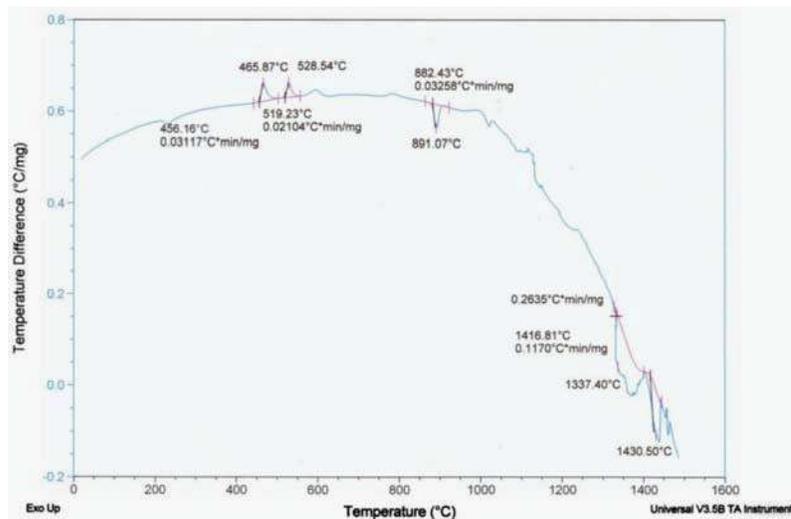


Figura 4.2 Análisis térmico diferencial de la cinta $\text{Ni}_{76.5}\text{Fe}_{4.2}\text{Cr}_{13}\text{B}_{2.8}\text{Si}_{4.5}$.

En los resultados obtenidos por medio de esta prueba se puede observar que hay un ligero pico endotérmico a la temperatura de 456.16° C y después hay dos picos exotérmicos a las temperaturas de 465.87 y 519.23° C respectivamente, correspondientes a las temperaturas de cristalización. Hay un pico endotérmico más pronunciado a la temperatura de 891.07° C, además aparecen dos picos endotérmicos a las siguientes temperaturas de 1337.40 y 1430.50° C. La última temperatura es a la cual la cinta pasa al estado líquido (1430.50° C). Según lo reportado en la literatura ⁽⁴⁷⁾ la temperatura de unión de esta cinta es 1135° C, sin embargo se decidió trabajar a las temperaturas de 1105 y 1170° C ya que en esta prueba se observa que el intervalo que hay entre 891.07° C y 1430.50° C es grande

y permite trabajar a dichas temperaturas, además de que la cinta a las temperaturas de 1105 y 1170° C muestra una facilidad para unir el acero sin llegar a la temperatura de líquido.

Así mismo, la cinta metálica amorfa se sometió a un microanálisis químico de elementos, en la figura 4.3 se presenta la superficie de la cinta y en la tabla 4.1 se presenta la cuantificación de la cinta $Ni_{76.5} Fe_{4.2} Cr_{13} B_{2.8} Si_{4.5}$, donde se puede comprobar los elementos que la componen así como la cantidad, cabe destacar que el Boro por la cantidad tan pequeña que contiene no se pudo cuantificar.

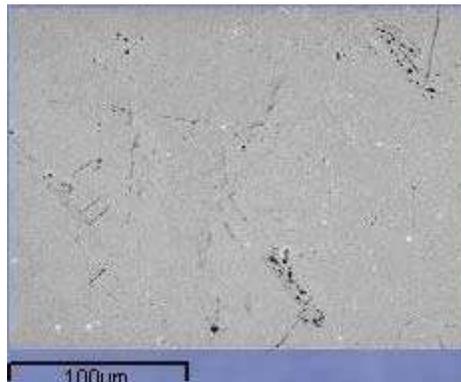


Figura 4.3 Superficie de la cinta metálica amorfa.

Tabla 4.1 Análisis por EDS de la Cinta metálica amorfa base níquel.

CUANTIFICACIÓN DE LA CINTA METÁLICA AMORFA			
(% ATÓMICO)			
Si	Cr	Fe	Ni
11.77	15.78	6.80	65.64

En la tabla 4.2 se presentan los análisis proporcionados por la empresa Metglas®.

Tabla 4.2 Propiedades Químicas de la cinta metálica amorfa.

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA CINTA METÁLICA AMORFA					
Composición % peso					
B	Cr	Fe	Ni	Si	Co (posible impureza)
1 – 5	10- 20	1 - 5	70 – 80	3 – 7	1 (máx.)

Como se puede observar los resultados obtenidos de la cuantificación de elementos de la cinta metálica amorfa se encuentran dentro del rango marcado por la empresa proveedora del material, mismo que se presenta en la sección de “Desarrollo Experimental” de la presente tesis.

4.1.2 ACERO INOXIDABLE 316 L

En lo que respecta al Acero Inoxidable 316L, la superficie a unir también fue observada en el Microscopio Electrónico de Barrido, en la figura 4.4 se presenta dicha superficie.

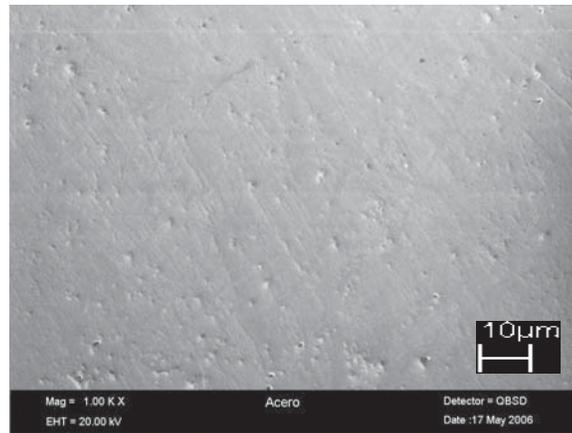


Figura 4.4 Superficie del acero inoxidable 316L.

Así mismo se realizó un microanálisis químico de elementos, cuyos resultados se presentan en la tabla 4.3. El análisis se realizó con el fin de comprobar los elementos que lo componen así como la cantidad.

Tabla 4.3 Análisis por EDS del Acero Inoxidable 316L.

CUANTIFICACIÓN DEL ACERO INOXIDABLE 316 L (% ATOMICO)			
Cr	Fe	Ni	Mo
25.08	66.73	5.84	2.35

Las muestras del acero inoxidable 316L fueron devastadas previamente a ser usadas en la unión. Por lo que se les sometió a un análisis por microscopía de fuerza atómica con el propósito de estudiar la rugosidad superficial de las muestras a unir. En las figuras 4.5 a 4.7 se muestran los resultados de las probetas que fueron devastadas y analizadas.

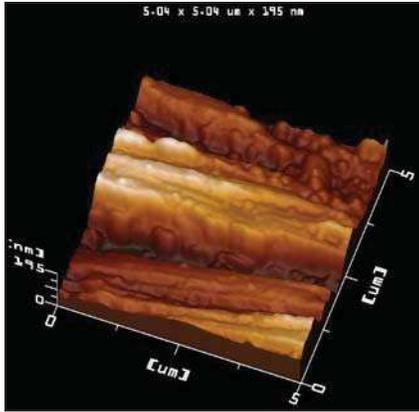


Figura 4.5 Imagen de 3D por MFA del Acero Inoxidable 316L 5 x 5nm.

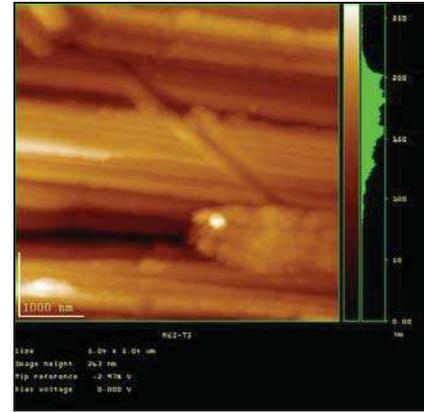


Figura 4.6 Imagen por MFA del Acero Inoxidable 316L.

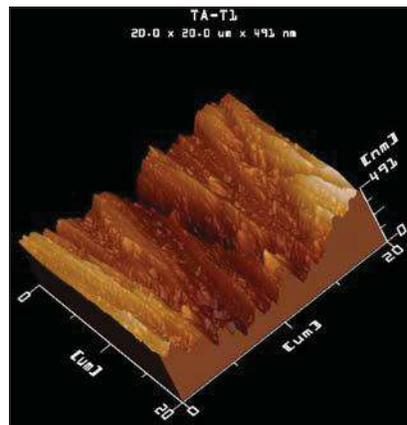


Figura 4.7 Imagen de 3D por MFA del Acero Inoxidable 316 L 20 x 20nm.

La morfología de la rugosidad superficial de las muestras a unir es un factor muy importante dentro de los procesos de unión, ya que de estos depende el área inicial de contacto entre los materiales.

Así mismo con el fin de revelar la estructura o fases de acero inoxidable 316L se realizó un ataque químico con el reactivo Murakami modificado ⁽⁴⁶⁾. En la figura 4.8 se muestra una micrografía del ataque químico en el acero inoxidable 316L antes de someterse a la unión.

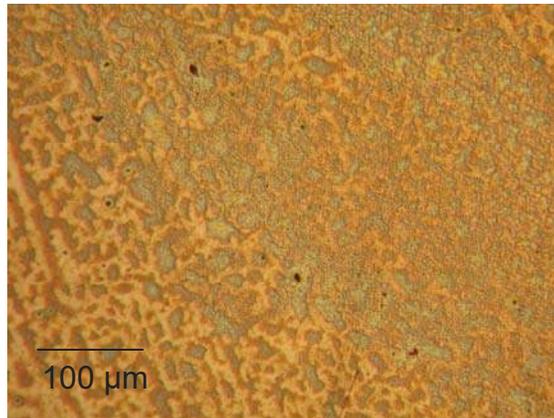


Figura 4.8 Micrografía del acero inoxidable 316L sometida al ataque químico.

Como se puede observar, la parte de color naranja corresponde a la fase gamma del acero, la parte café claro y verde corresponde a la formación o contenidos de carburos ⁽⁴⁶⁾.

A continuación en la tabla 4.4 se presentan algunas propiedades del acero inoxidable de diferentes códigos AISI.

Tabla 4.4 Propiedades físicas de los aceros inoxidables ⁽⁴⁸⁾ y ⁽⁴⁹⁾.

PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS ACEROS INOXIDABLES				
Acero Inoxidable	Composición (% peso)	Densidad (g cm ⁻³)	Punto de fusión (°C)	Coefficiente de expansión térmica (20- 100°C, 10 ⁻⁶ K ⁻¹)
AISI 304	Fe/18 Cr/10 Ni	7.93	1400-1455	18.0
AISI 316	Fe/18 Cr/9 Ni/3 Mo	7.96	1370-1400	16-18
AISI 321	Fe/18 Cr/9 Ni/1 Ti	7.90	1400-1425	18.0
AISI 316L	Fe/Cr 18 Ni/10 Mo/3	8.027	1370-1400	16-18

En la tabla anterior se observa que el punto de fusión del acero inoxidable AISI 316L está en un rango de 1370 – 1400° C, es por eso que al llevar a cabo el proceso de unión el acero pasa por un tratamiento térmico. El coeficiente de expansión térmica del acero inoxidable AISI 316L es alto.

4.2 UNIONES ACERO INOXIDABLE 316L / ALEACIÓN AMORFA ($\text{Ni}_{76.5}\text{Fe}_{4.2}\text{Cr}_{13}\text{B}_{2.8}\text{Si}_{4.5}$) / ACERO INOXIDABLE 316L

Se realizaron uniones de acero inoxidable 316L (Al 316L) / aleación amorfa ($\text{Ni}_{76.5}\text{Fe}_{4.2}\text{Cr}_{13}\text{B}_{2.8}\text{Si}_{4.5}$) / Al 316L a las temperaturas de 1105 y 1170° C, utilizando diferentes tiempos de unión. Se observó que las muestras se unieron satisfactoriamente a todos los tiempos utilizados. Es posible llevar a cabo la unión a dichas temperaturas, sin llegar a la temperatura de fusión de la aleación metálica amorfa ($\text{Ni}_{76.5}\text{Fe}_{4.2}\text{Cr}_{13}\text{B}_{2.8}\text{Si}_{4.5}$), en acorde a lo sugerido por el proveedor, para el rango de unión de la aleación ⁽⁵⁰⁾.

La tabla 4.5 muestra los resultados obtenidos para las condiciones utilizadas en el sistema Al 316L / cinta ($\text{Ni}_{76.5}\text{Fe}_{4.2}\text{Cr}_{13}\text{B}_{2.8}\text{Si}_{4.5}$) / Al 316L durante el proceso de unión, que de acuerdo a la figura 2, la cinta amorfa deja de serlo a una temperatura de 465.87° C, temperatura a la cual la cinta comienza a pasar a fase cristalina.

Tabla 4.5 Resultados de la unión Al 316L / cinta/ Al 316L en Nitrógeno.

Temperatura (° C)	Tiempo (minutos)	Resultado
1105	5, 10 , 15,	Unidas
1170	20, 40	Unidas

Atmósfera: Nitrógeno

Como se puede observar es posible obtener resultados de unión satisfactoria a las condiciones empleadas aún sin llegar a la temperatura de fusión de la cinta amorfa, lo cual sugiere un proceso de unión en fase sólida que requiere solamente de 5 minutos a 1105° C para unirse.

4.2.1 CARACTERIZACIÓN INTERFACIAL DE LA UNIÓN DE ACERO INOXIDABLE 316L / CINTA ($Ni_{76.5} Fe_{4.2} Cr_{13} B_{2.8} Si_{4.5}$) / ACERO INOXIDABLE 316L

Las muestras unidas fueron observadas en su sección transversal con el propósito de evaluar la interacción metal / metal producida durante el proceso de unión y poder dar un rastreo de la zona de reacción en función de la temperatura y el tiempo de unión, que permita analizar el seguimiento de la interacción durante la etapa de unión.

Las figuras 4.9 (a) y (b) presentan las interfases de unión observadas en muestras unidas a 1105° C por 5 y 10 minutos, respectivamente. Como se puede observar, la interacción entre el elemento de unión y el acero no se ha dado completamente y existen aún islas sin unir y poros remanentes para ambos tiempos, sin embargo estos se ven disminuidos para 10 minutos.

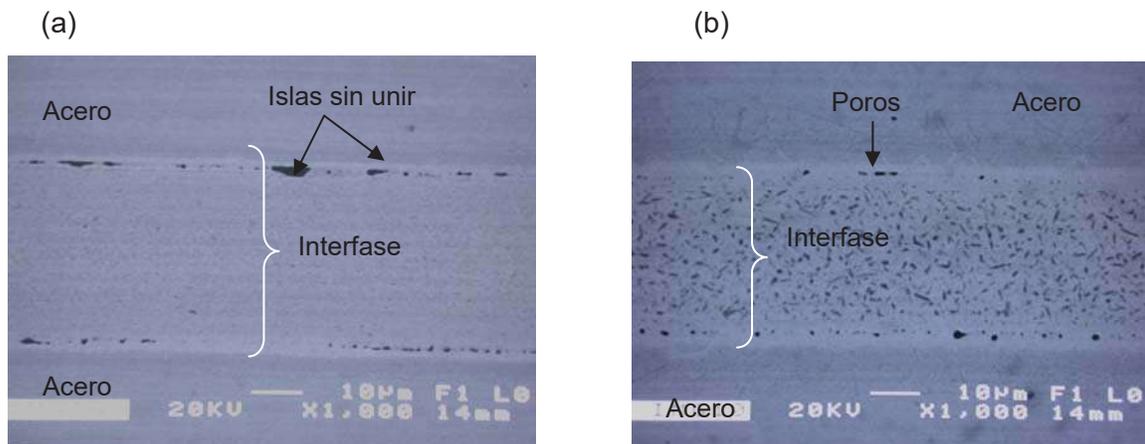


Figura 4.9 Sección transversal de la zona de unión para muestras tratadas a 1105° C para: (a) 5 minutos y (b) 10 minutos en una atmósfera de N_2 .

Por otro lado, la figura 4.10 (a) presenta la unión a 1105° C y 20 minutos en la cual se presenta una mejor interacción, sin embargo se presentan poros aunque no están

en la frontera de la unión. Así mismo la figura 4.10 (b) muestra la unión a 1105° C por 40 minutos en la cual se observa que hay una interacción completa entre el elemento de unión y el acero. Esta interfase se caracteriza por presentar una línea de unión uniforme, homogénea y con ausencia de porosidades, lo cual indica que el tiempo de unión a esta temperatura ha sido suficiente para eliminar las islas y poros que se encontraban anteriormente.

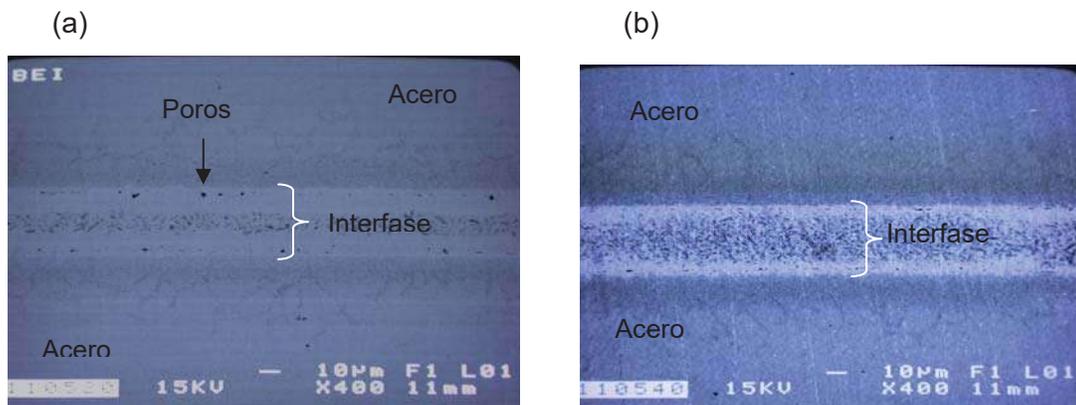


Figura 4.10 Sección transversal de la zona de unión para muestras tratadas a 1105° C para: (a) 20 minutos y (b) 40 minutos en una atmósfera de N₂.

Con el propósito de clarificar el efecto de la temperatura en la unión de los materiales, se analizan las muestras unidas a 1170° C. En la figura 4.11 (a) se muestra la unión a 1170° C y 5 minutos en la cual se ve una interacción acero/cinta/acero pero con islas sin unir. Así mismo en la figura 4.11 (b) se muestra la unión a 1170° C y 10 minutos en la cual se observa que se han disminuido los poros y las islas sin unir.

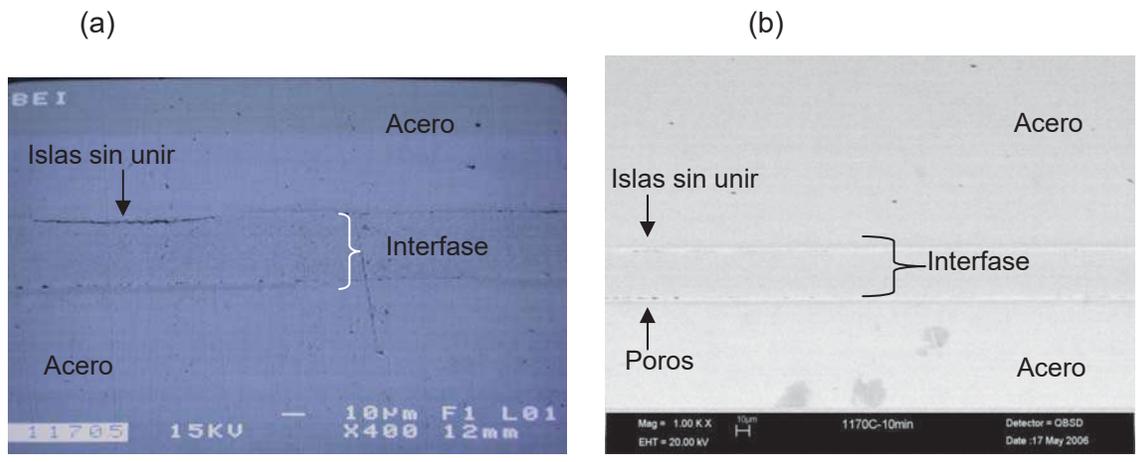


Figura 4.11 Sección transversal de la zona de unión para muestras tratadas a 1170° C para: (a) 5 minutos y (b) 10 minutos en una atmósfera de N₂.

Por otra parte en la figura 4.12 (a) se observa una interacción completa entre los materiales a unir. Esta figura tiene similitud a lo que se observa en la figura 4.10 (b). Así mismo en la figura 4.12 (b) se observa una unión, haciéndose presente porosidades remanentes pero no en la frontera de la unión sino dentro de la interfase.

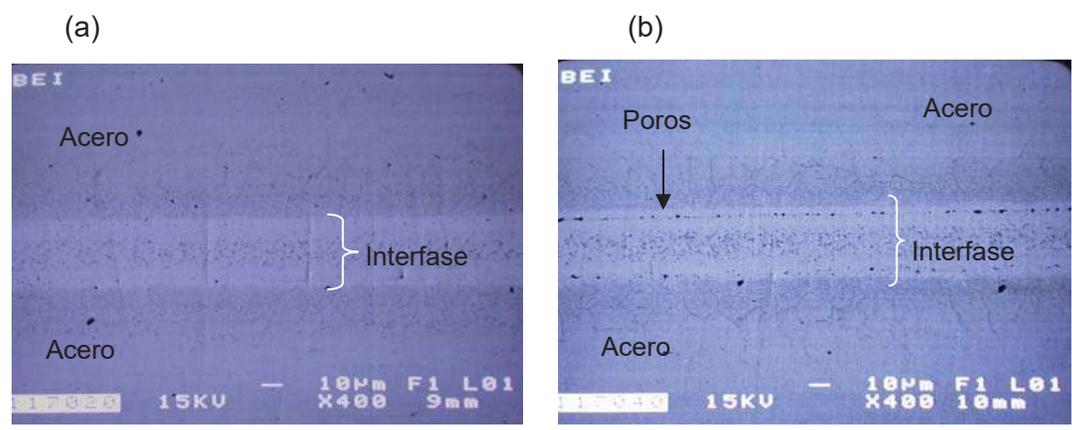


Figura 4.12 Sección transversal de la zona de unión para muestras tratadas a 1170° C para: (a) 20 minutos y (b) 40 minutos a una atmósfera de N₂.

4.2.2 MICROANÁLISIS PUNTUAL

En esta etapa de caracterización se realizaron análisis químicos en la interfase de las muestras unidas a las diferentes condiciones de trabajo. Esto se hizo con la finalidad de establecer los componentes de las fases observadas a través de la interfase, o posibles concentraciones de algunos elementos en ciertas áreas de la zona de unión.

Se realizó un análisis en línea de los elementos a través de la interfase de unión del sistema Al 316L / cinta ($\text{Ni}_{76.5} \text{Fe}_{4.2} \text{Cr}_{13} \text{B}_{2.8} \text{Si}_{4.5}$) / Al 316L, usando microanálisis puntual (EPMA –EDS) para la muestra unida a 1105°C por 5 minutos mostrada en la figura 4.13.

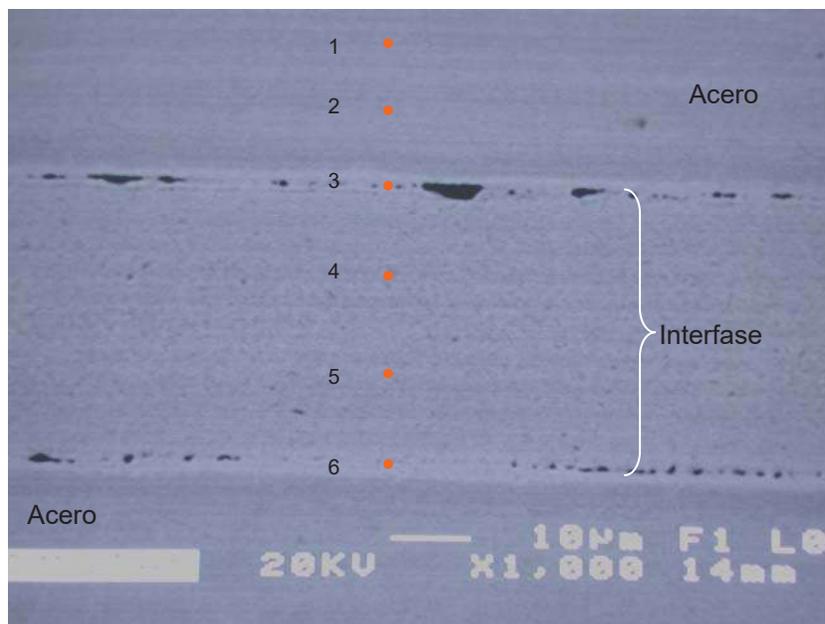


Figura 4.13 Análisis puntual a través de la interfase para la muestra unida a 1105°C por 5 minutos.

Los resultados se presentan en la tabla 4.6. Se puede observar que los elementos presentes en los puntos 1, 2 y 3 de la figura 4.13, que coinciden con los elementos principales que componen el acero (Cr, Fe y Ni), sin embargo, es importante hacer notar la presencia de silicio en esta zona que se encuentra en una cantidad pequeña.

Así mismo en los puntos 4 y 5 se encontró un incremento de níquel (58.11 y 61.72 % atómico) respectivamente, además de que destaca la disminución de Hierro en ambos puntos (26.59 y 8.93 % atómico) respectivamente; por otro lado aumenta el silicio en los dos puntos (8.17 y 8.42 % atómico) respectivamente. Estos análisis corresponden a la cinta.

En el punto 6 se observa un ligero aumento de Níquel (68.15 % atómico) y Silicio (10.79 % atómico) pero disminuye el Hierro (4.23 % atómico) y el Cromo (16.83 % atómico), en este punto hay interacción de los elementos, ya que se encuentra en una zona cercana al límite de unión.

Tabla 4.6 Resultados de EPMA de los puntos señalados en la interfase del sistema Al 316L/cinta/ Al 316L para la muestra unida a 1105 por 5 min., mostrada en la figura 4.13.

Análisis	Si	Cr	Fe	Ni	% Atómico
1	1.25	20.07	70.24	8.45	100
2	2.55	19.55	68.37	9.54	100
3	1.73	20.37	69.60	8.30	100
4	8.17	7.13	26.59	58.11	100
5	8.42	20.94	8.93	61.72	100
6	10.79	16.83	4.23	68.15	100

Con el propósito de tener una mejor visión de los resultados obtenidos, estos se muestran en forma de gráfica en la figura 4.14.

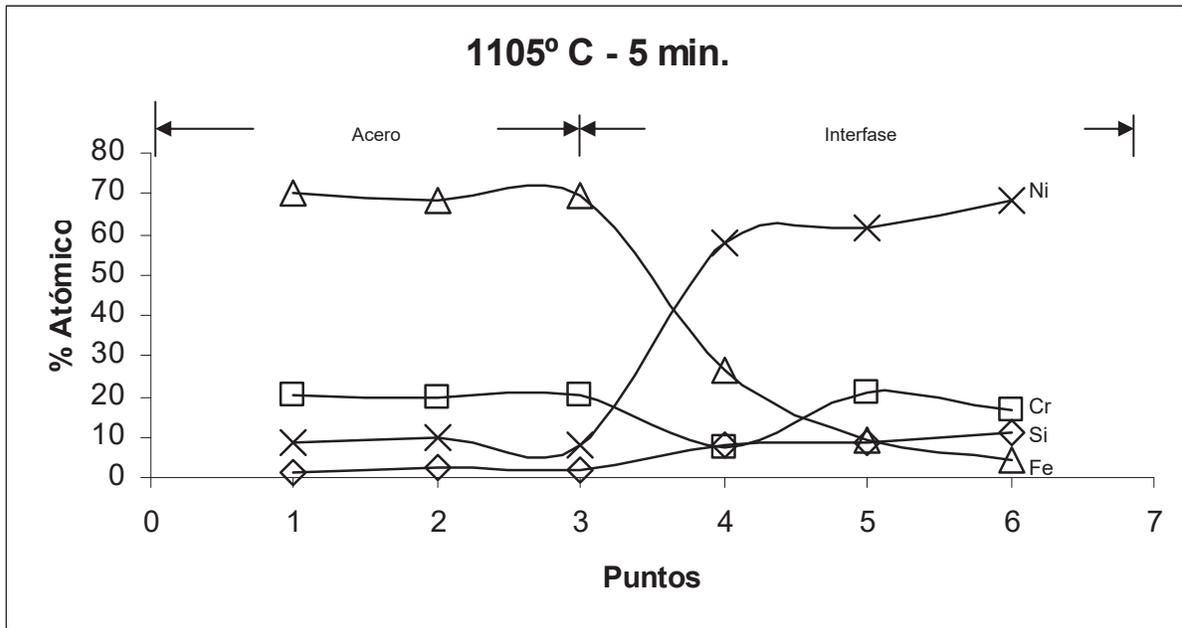


Figura 4.14 Resultados de los análisis realizados en los puntos mostrados en la interfase de la figura 4.13.

Como se puede observar, tanto el níquel como el cromo se mantienen con ligeras variaciones dentro de la zona de unión, mientras que mantienen un valor constante sugiriendo una posible difusión de ellos dentro del acero.

Con el propósito de analizar el área mostrada en la zona de unión, se realizó un mapeo cualitativo de los elementos en la muestra unida a 1105° C por 5 minutos, cuyos resultados se muestran en la figura 4.15.

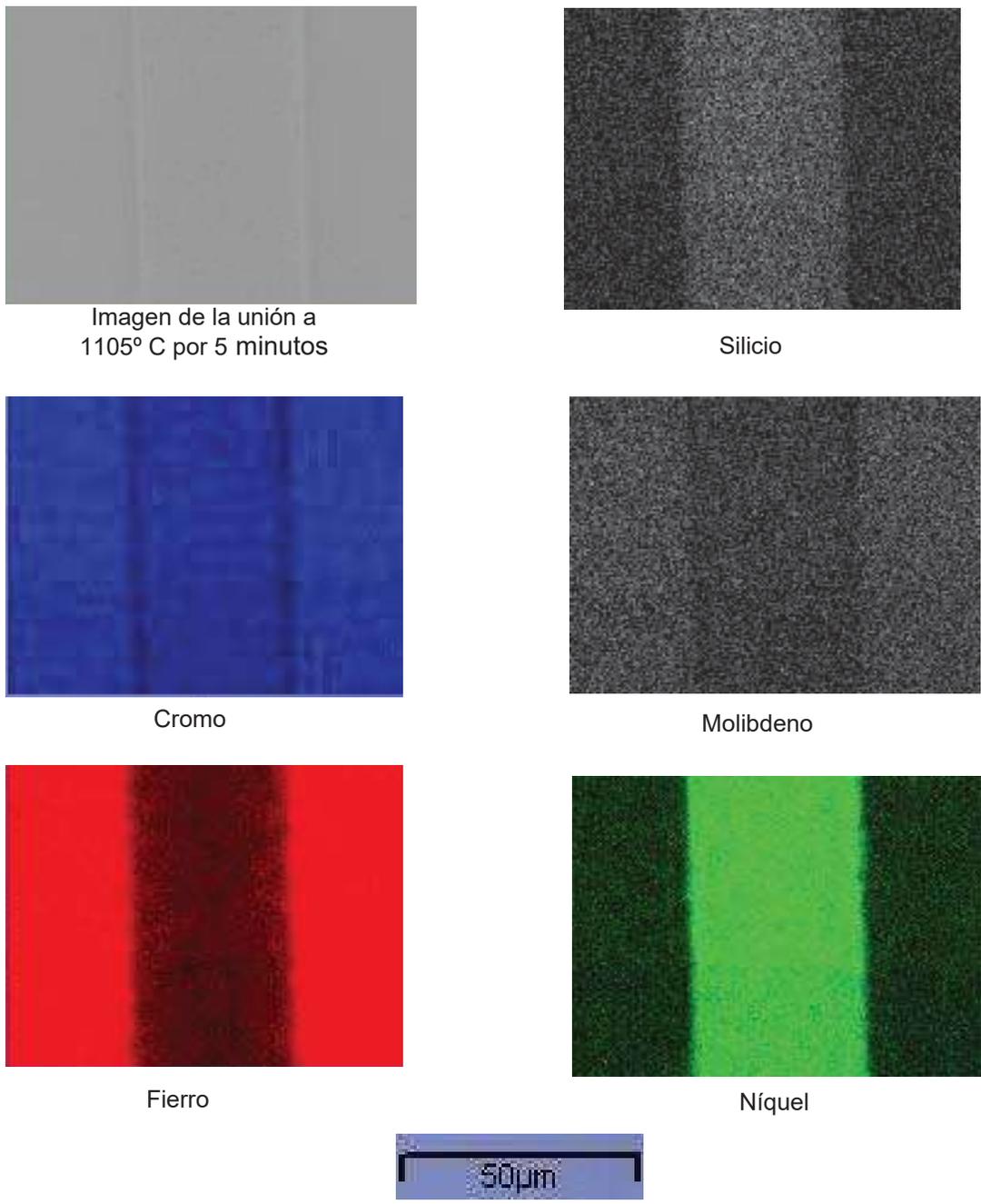


Figura 4.15 Distribución atómica en la interfase de una muestra Al 316L/ cinta / Al 316L unida a 1105° C por 5 minutos.

El mapeo de la figura 4.15 se realizó con el propósito de corroborar, sí la difusión de los elementos mencionados anteriormente, se había dado en forma uniforme a lo largo de la unión, además de tratar de identificar si existe la presencia de fases que se hubieran formado en la interfase durante el proceso de unión. El mapeo muestra la distribución atómica de los elementos en la interfase de unión donde se observa que los principales elementos son el silicio, cromo, fierro y níquel, como se puede observar tanto el níquel como el silicio se encuentran principalmente en el centro de la zona de unión, distribuidos en forma homogénea.

Se realizaron análisis en las zonas A y B de la muestra producida a 1105° C por 20 minutos, mostrada en la figura 4.16. Los resultados se presentan en la tabla 4.7 donde se puede observar que la zona B se caracteriza por presentar un elevado contenido de níquel (Ni, 71.45% atómico), así como cantidades menores de silicio, cromo y fierro. Sin embargo, se observa la aparición de fases A con composición similar a la zona B, mostrando un ligero incremento de níquel (Ni, 73.66% atómico), y una disminución ligera de silicio, cromo y fierro. Estos resultados se pueden comparar con los resultados de la cinta.

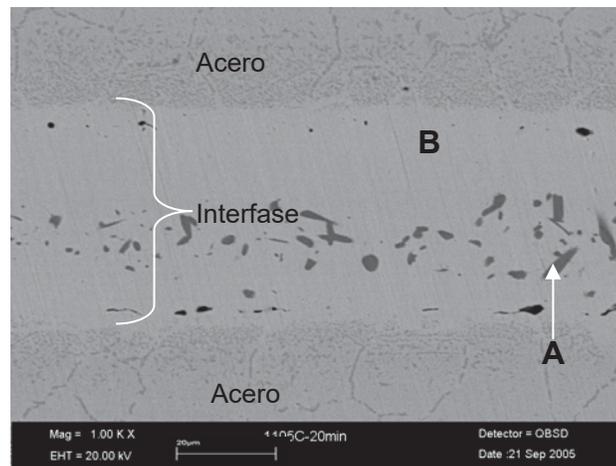


Figura 4.16 Interfase del sistema Al 316L / cinta / Al 316L de una muestra unida a 1105° C por 20 minutos.

Tabla 4.7 Resultados por EDS en la interfase del sistema Al 316L/cinta/ Al 316L a 1105° C por 20 min.

CUANTIFICACIÓN DE ELEMENTOS EN LA UNIÓN A				
1105° C – 20 min. (% ATÓMICO)				
ZONA	Si	Cr	Fe	Ni
A	10.87	10.40	5.07	73.66
B	11.35	11.06	6.15	71.45

Por otra parte en la figura 4.17 se muestran las zonas a las cuales se les hizo microanálisis, así como en la tabla 4.8 se presenta la cuantificación de los elementos en las zonas ya mencionadas. Este análisis se realizó en la muestra unida a 1105° C y 40 minutos.

En la figura 4.17 se observa que la zona B se caracteriza por presentar un contenido alto de Níquel (Ni, 71.27% atómico), así como cantidades pequeñas de Silicio, Cromo y Hierro. Se puede observar también la aparición de la zona C, con una composición alta de Cromo (Cr, 96.58% atómico), y con cantidades muy bajas de Níquel, Hierro y Silicio. Además de que hay una disminución de la zona A que no fue posible analizar.

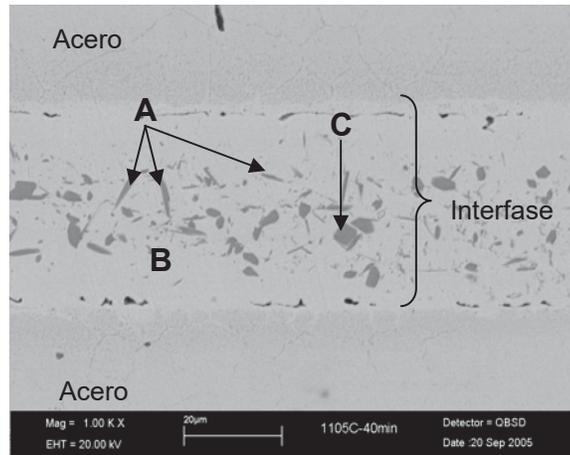


Figura 4.17 Interfase del sistema Al 316L / cinta / Al 316L de una muestra unida a 1105° C por 40 minutos.

Tabla 4.8 Resultados por EDS en la interfase del sistema Al 316L/cinta/ Al 316L a 1105° C por 40 min.

CUANTIFICACION DE ELEMENTOS EN LA UNIÓN A				
1105° C – 40 min. (% ATOMICO)				
ZONA	Si	Cr	Fe	Ni
C	0.29	96.58	1.18	1.94
B	10.59	8.09	10.05	71.27

Se realizó un análisis en línea de los elementos a través de la interfase de unión del sistema Al 316L / cinta / Al 316L, usando microanálisis puntual (EPMA –EDS) para la muestra mostrada en la figura 4.18 correspondiente a la unión producida a 1170° C por 5 minutos.

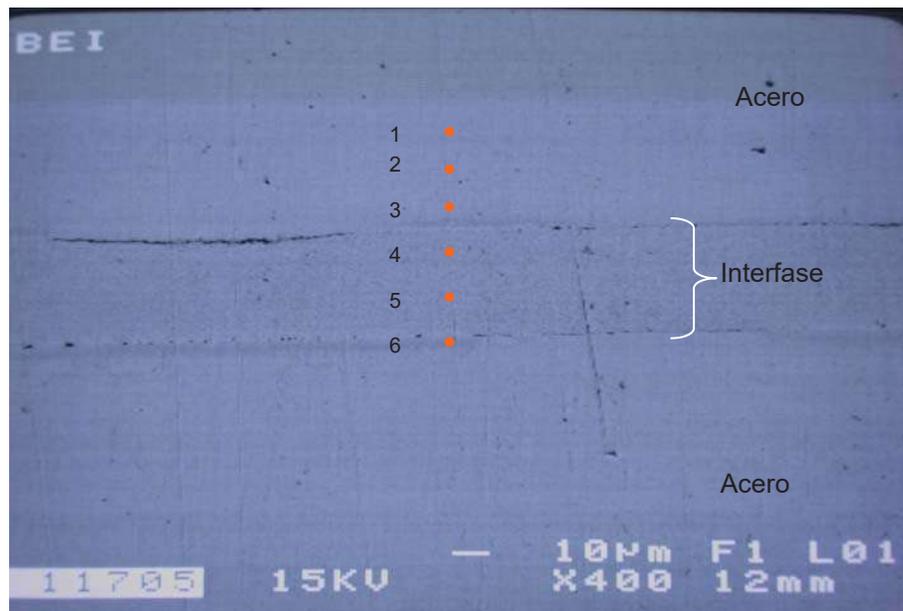


Figura 4.18 Análisis puntual a través de la interfase para la muestra unida a 1170° C por 5 minutos.

La tabla 4.9 muestra los resultados de los elementos presentes en los puntos de la figura 4.18 donde se observa que los elementos presentes en los puntos 1, 2 y 3 de la figura 4.18 coinciden con los elementos que componen el acero (Cr, Fe y Ni), sin embargo, hay que hacer notar que la presencia de silicio en el punto 1 es nula y en el punto 2 hay una cantidad considerable (12.55 % atómico), además de que en el punto 3 de esta zona se encuentra en una cantidad pequeña.

Así mismo en los puntos 4 y 5 se encontró una disminución de Níquel (9.32 y 9.74 % atómico) respectivamente, además de que destaca el aumento de Hierro en ambos

puntos (69.52 y 67.88 % atómico) respectivamente, por otro lado el silicio en los dos puntos (2.09 y 2.38 % atómico) respectivamente se mantiene. Estos análisis corresponden a la interfase.

En el punto 6 se observa que el Níquel (9.67 % atómico) se mantiene constante en relación a los puntos 4 y 5 y el Silicio (1.45 % atómico) disminuye en comparación a los puntos anteriores, el Hierro (69.08 % atómico) se mantiene al igual que el Cromo (19.80% atómico), en relación con los otros puntos.

Tabla 4.9 Resultados de EPMA de los puntos señalados en la interfase del sistema Al 316L/Cinta/ Al 316L para la muestra unida a 1170 por 5 min., mostrada en la figura 4.18.

Análisis	Si	Cr	Fe	Ni	% Atómico
1	-	21.68	70.65	7.67	100
2	12.55	17.30	3.53	66.62	100
3	1.34	20.40	69.59	8.67	100
4	2.09	19.08	69.52	9.32	100
5	2.38	19.99	67.88	9.74	100
6	1.45	19.80	69.08	9.67	100

Los resultados se pueden observar mejor en la gráfica de la figura 4.19.

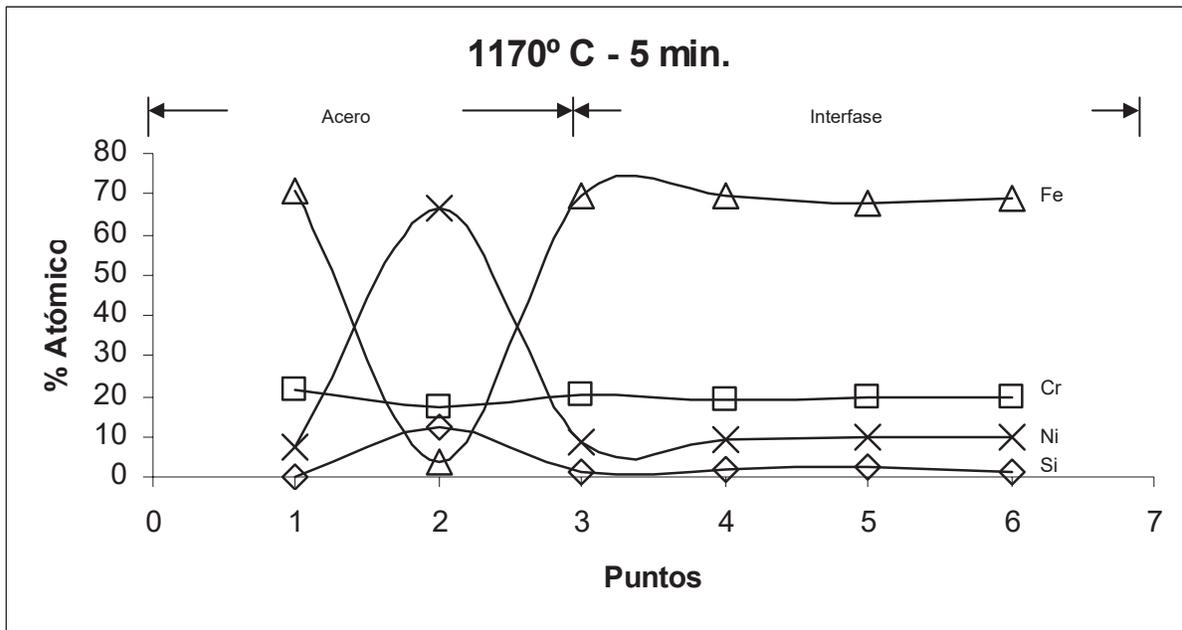


Figura 4.19 Resultados de los análisis realizados en los puntos mostrados en la interfase de la figura 4.18.

En la figura 4.19 se puede ver que los puntos 1, 2 y 3 están dentro del acero, a su vez muestran los principales elementos del acero (cromo, níquel y fierro), sin embargo en el punto 2 se presenta una disminución de fierro y un aumento de níquel, al parecer es una fase dentro del acero que pudiera ser algún nitruro de níquel o carburo de níquel.

Por otro lado en los puntos correspondientes a la interfase (del punto 4 al 6), confirman el aumento de fierro y el resto de los elementos se mantienen constantes.

La figura 4.20 muestra las zonas donde se realizó microanálisis y en la tabla 4.10 se muestra la cuantificación de los resultados obtenidos para la muestra unida a 1170°C por 20 minutos.

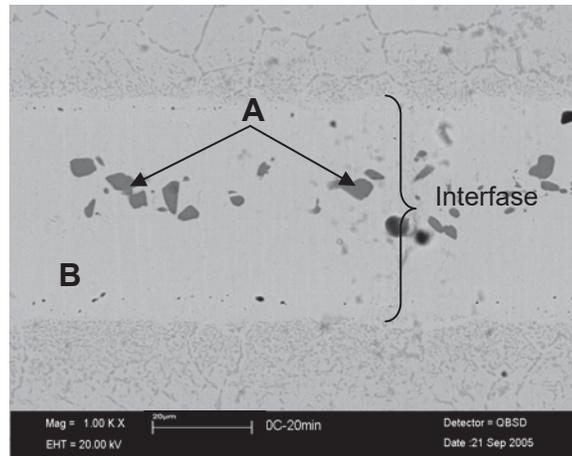


Figura 4.20 Interfase del sistema Al 316L / Aleación amorfa / Al 316L de una muestra unida a 1170° C por 20 minutos.

Tabla 4.10 Resultados por EDS en la interfase del sistema Al 316L/Aleación amorfa/ Al 316L a 1170° C por 20 min.

CUANTIFICACIÓN DE ELEMENTOS EN LA UNION				
1170° C – 20 min. (%ATOMICO)				
ZONA	Si	Cr	Fe	Ni
A	10.41	15.90	8.88	64.8
B	10.01	14.41	7.55	68.02

Para resumir la figura 4.21 muestra las zonas en las uniones donde se llevaron a cabo los correspondientes microanálisis, así mismo la tabla 4.11 presenta los resultados de las cuantificaciones de las zonas seleccionadas.

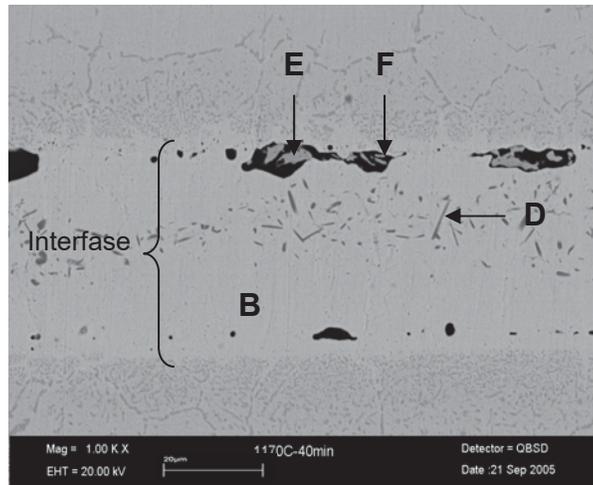


Figura 4.21 Interfase del sistema Al 316L / Cinta / Al 316L de una muestra unida a 1170° C por 40 minutos.

En la figura 4.21 se puede observar la presencia de posibles fracturas que probablemente surgieron durante la preparación de las muestras, dichas zonas se señalan con las letras E y F, esto es debido a que las concentraciones de níquel son muy bajas, sugiriendo un desnivel de la fase dentro de la fisura, además de la presencia de azufre.

Tabla 4.11 Resultados por EDS en la interfase del sistema Al 316L/Cinta/ Al 316L a 1170° C por 40 min.

CUANTIFICACIÓN DE ELEMENTOS EN LA UNIÓN A					
1170° C – 40 min. (% ATOMICO)					
ZONA	Si	Cr	Fe	Ni	S
D	5.29	35.90	11.26	47.55	-
B	10.09	13.94	8.43	67.54	-
E	3.69	69.42	23.73	3.16	-
F	6.05	15.25	38.76	38.83	1.11

4.3 EVALUACIÓN MECÁNICA INTERFACIAL

Las uniones metal/metal juegan un papel central en el diseño de ingeniería, en especial como elementos estructurales. El uso extensivo de las uniones de metales como elementos estructurales conduce a concentrarse en las propiedades mecánicas de la unión. La prueba de tensión proporciona los datos básicos de diseño, incluyendo el módulo de elasticidad, la resistencia a la cedencia, resistencia a la tensión, ductilidad y tenacidad, para muestras metal/metal unidas.

Para evaluar la resistencia mecánica de las uniones Al 316L / cinta / Al 316L, fue necesario producir una serie de muestras unidas de acuerdo a la Norma ANSI/AWS C3.2-82, conforme al apartado 1 que señala el diseño para pruebas de tensión al corte. Las muestras usadas para la prueba mecánica tienen una longitud de 70 mm., cada una y un espesor de 3 mm., y fueron unidas de manera traslapada como se muestra en la figura 4.22.

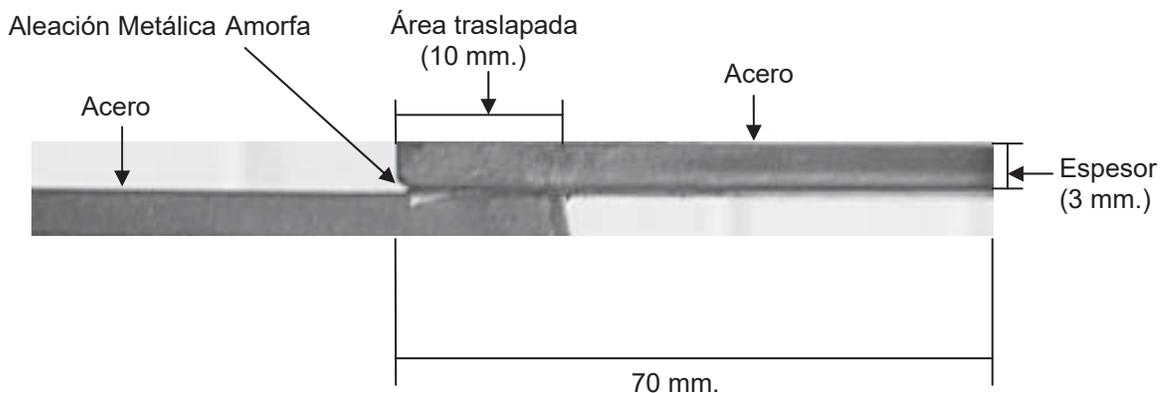


Figura 4.22 Muestra unida para la prueba de tensión al corte.

Con el propósito de estudiar el efecto del tiempo de unión en la resistencia interfacial para las muestras unidas a las diferentes temperaturas. Se midió la resistencia de tensión al corte para el sistema Al 316L / cinta / Al 316L en muestras unidas a la temperatura de 1105 y 1170° C por tiempos de 5, 10, 15, 20 y 40 minutos. Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 4.23 y 4.24, para las temperaturas de 1105 y 1170° C respectivamente.

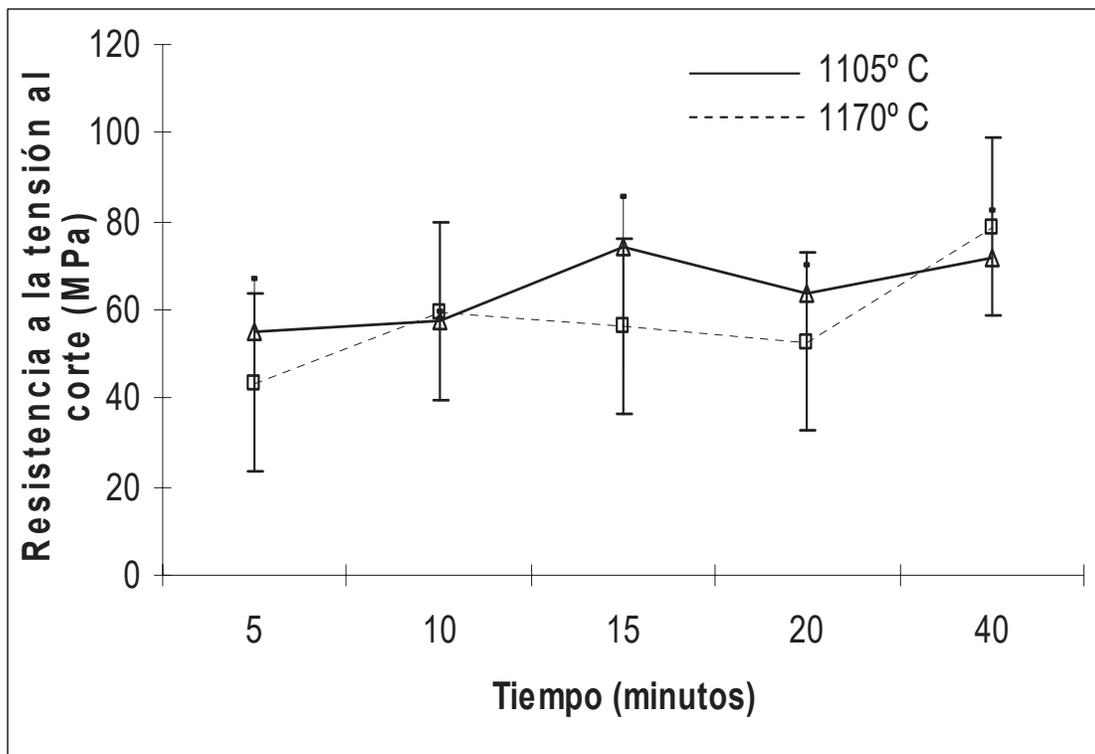


Figura 4.23 Efecto del tiempo de unión en la resistencia a la tensión al corte para muestras unidas a 1105 y 1170° C. Los rangos de la tensión al corte representan los valores promedios de al menos 5 muestras para cada tiempo.

Como se puede observar en la figura 4.23, las muestras unidas a 1105° C se registraron un valor al corte máximo de 74.25 MPa en promedio en las muestras unidas por 15 minutos, sin embargo, este valor de resistencia decrece al incrementarse el tiempo hasta valores promedios de 63.70 MPa a 20 minutos y 71.72 MPa a 40 minutos. Por otra parte en la misma figura se observa que para las muestras unidas a 1170° C se registraron un valor promedio de 78.70 MPa a 40 minutos, observando un valor mayor a los 40 MPa para los tiempos menores considerado por otros investigadores ^(51,52) como un valor aceptable para este tipo de evaluación.

En 1105° C el valor promedio máximo fue a 15 minutos, mientras disminuye para los otros tiempos. Al aumentar la temperatura el comportamiento es diferente ya que en las muestras unidas a 1170° C el valor promedio aumenta conforme aumenta el tiempo de unión.

Se puede considerar que tal aumento en los valores promedio es debido a la interacción del acero con la cinta amorfa, dicha interacción se da mejor al aumentar la temperatura.

Las máximas resistencias al corte obtenidas fueron de 85.38 y 84.26 MPa, correspondientes a 1105 y 1170° C, respectivamente.

En sistemas similares se observa un comportamiento parecido en dichas pruebas. Yao-Wen Wang et al ⁽⁵¹⁾, unieron nitruro de silicio metalizado con titanio con un acero al carbón por soldadura de arco, observando una resistencia a la tensión al corte de 85 MPa. En otro sistema similar Jicai FENA et al ⁽⁵²⁾, unieron cermet de TiC / aleación de Ag-Cu-Zn / acero por medio de brazing, obteniendo un valor máximo de tensión al corte de 120.7 MPa para una unión a 850° C por 10 minutos.

4.3.1 ANÁLISIS DE LA FRACTURA

Un análisis de las muestras fracturadas después de la prueba de tensión al corte muestra un tipo de fractura en la interfase de unión similar en todas las muestras, dicha fractura ocurre en la zona de unión correspondiente a la cinta metálica, este tipo de fractura se observa en las muestras tratadas a ambas temperaturas de trabajo.

La figura 4.24 muestra la fractura obtenida a una muestra unida a 1105° C por 5 minutos después de la prueba mecánica de tensión al corte, a la cual se le realizó un análisis químico en diferentes zonas de la fractura, como se indica en dicha fotografía.

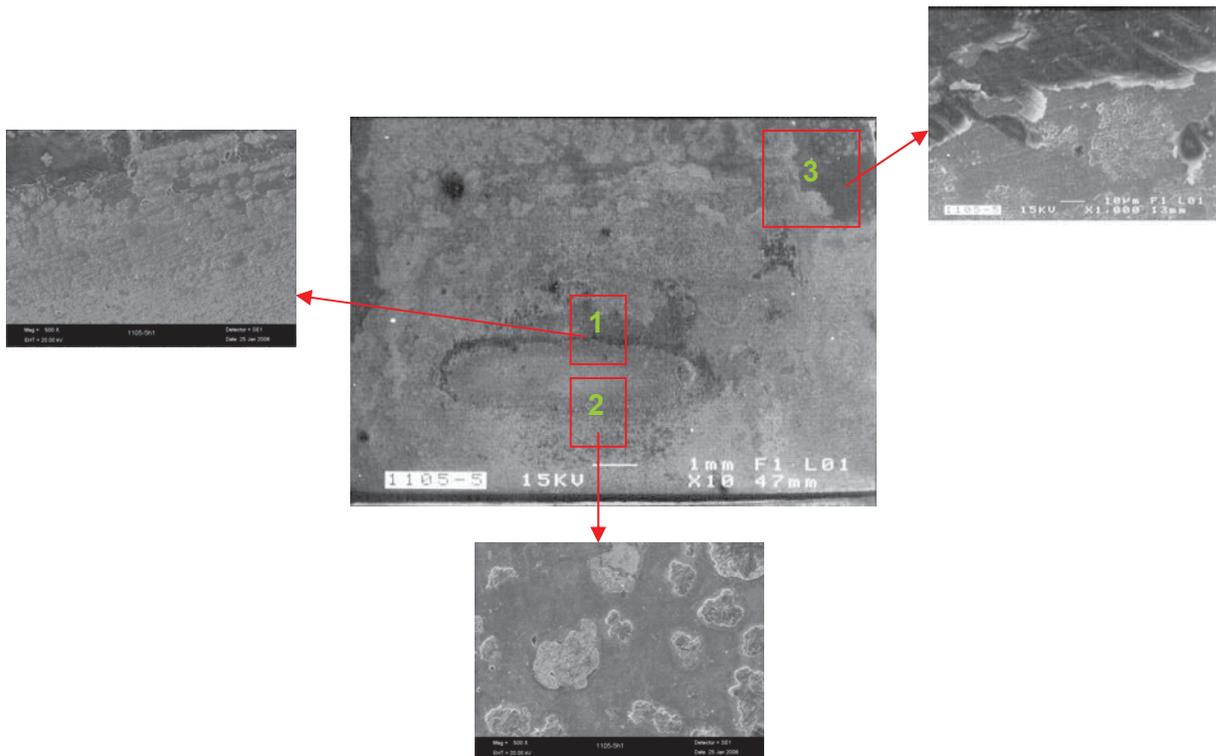


Figura 4.24 Imagen de la fractura a 1105° C por 5 minutos, después de la prueba mecánica de tensión al corte.

Un análisis en diferentes zonas de la interfase la fractura se muestra en forma cuantitativa en la tabla 4.12.

Tabla 4.12 Resultados por EDS de la fractura del sistema Al 316L/Cinta/ Al 316L a 1105° C por 5 minutos, después de la prueba de tensión al corte.

CUANTIFICACIÓN DE ELEMENTOS (% ATOMICO)				
Zona	Si	Cr	Fe	Ni
1	15.41	13.14	35.63	35.82
2	6.01	20.24	39.76	34.00
3	-	26.37	65.25	8.38

Los resultados indican que la fractura se da en la zona cercana a la línea de unión al acero, debido a la presencia de porosidades alineadas.

Así mismo en la figura 4.25 se presenta la parte opuesta de la fractura antes mencionada, además en la tabla 4.13 se muestran los resultados del análisis de elementos, donde se pueden observar diferentes zonas con residuos de la interfase de unión, concretando de que la fractura se da en la interfase de unión y no en el acero.

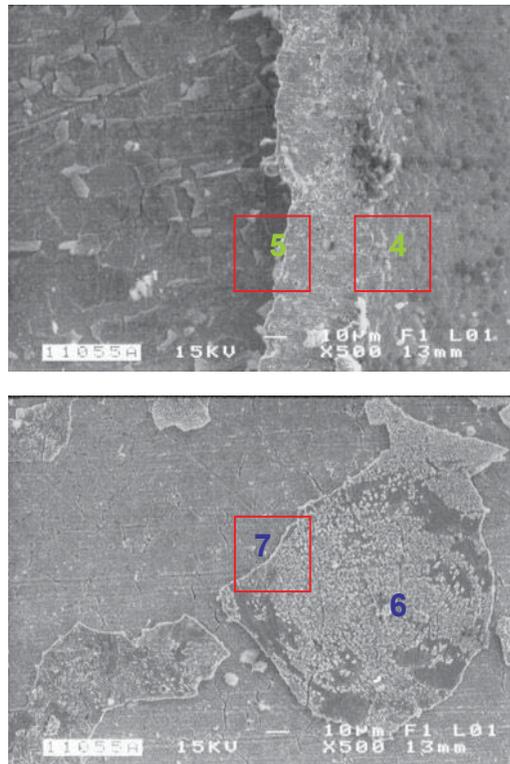


Figura 4.25 Imagen de la fractura a 1105° C por 5 minutos, después de la prueba mecánica de tensión al corte, correspondiente a la parte opuesta de la muestra.

Tabla 4.13 Resultados por EDS de la fractura del sistema Al 316L/Cinta/ Al 316L a 1105° C por 5 minutos, después de la prueba de tensión al corte, correspondientes a la parte opuesta de la muestra.

CUANTIFICACIÓN DE ELEMENTOS (% ATOMICO)					
Zona	Si	Cr	Fe	Ni	Mo
4	7.83	10.69	19.91	61.58	-
5	10.02	20.49	12.79	56.70	-
6	6.17	14.14	79.69	-	-
7	1.83	15.62	63.02	15.46	4.03

Se realizó un análisis químico a una muestra fracturada a la temperatura de 1170° C por 5 minutos, la figura 4.26 muestra la imagen de la fractura así como las zonas que se analizaron. En la tabla 4.14 se presentan los resultados obtenidos del análisis.

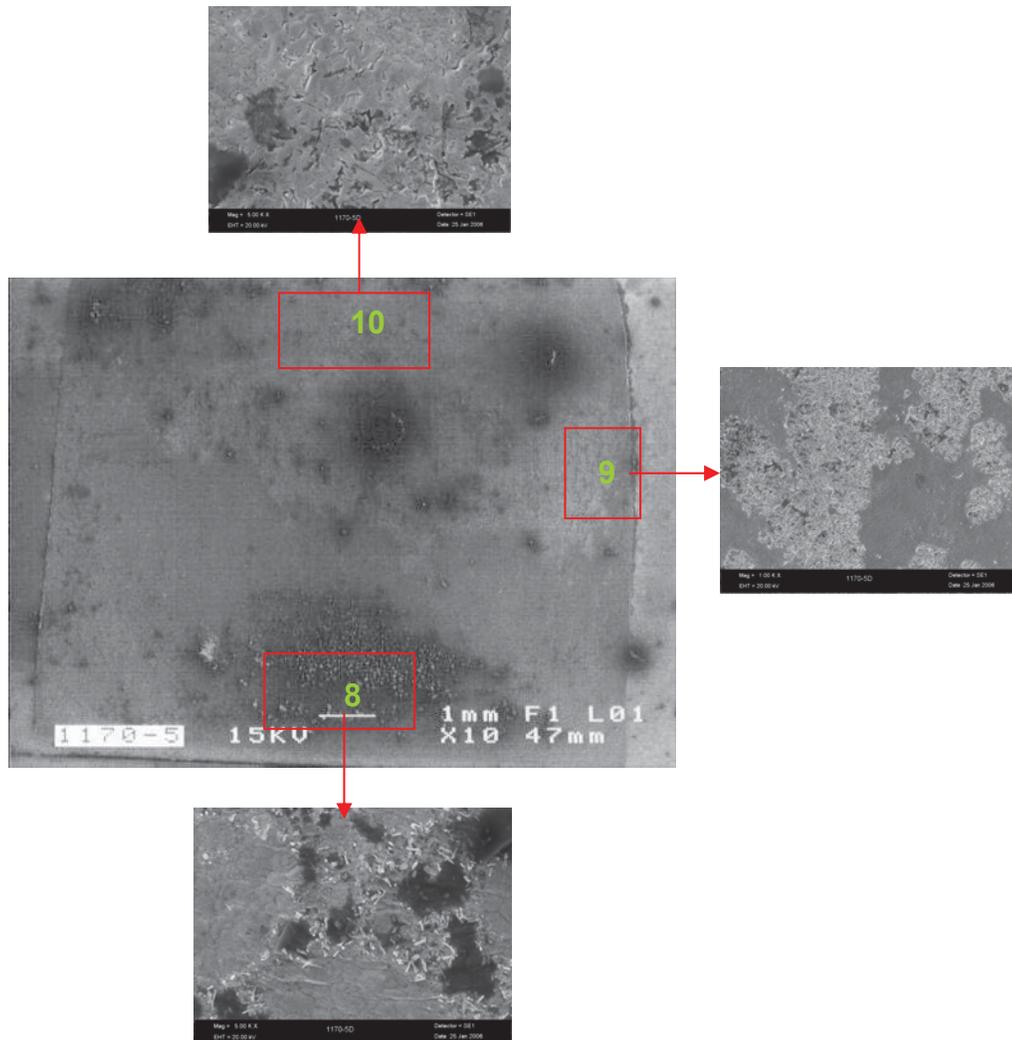


Figura 4.26 Imagen de la fractura a 1170° C por 5 minutos, después de la prueba mecánica de tensión al corte.

Tabla 4.14 Resultados por EDS de la fractura del sistema Al 316L/Cinta/ Al 316L a 1170° C por 5 minutos, después de la prueba de tensión al corte.

CUANTIFICACIÓN DE ELEMENTOS (% ATOMICO)				
Zona	Si	Cr	Fe	Ni
8	13.91	15.38	3.29	67.41
9	8.94	16.75	13.32	60.99
10	8.72	17.22	6.77	67.28

También se analizó la parte opuesta de la fractura de la muestra a 1170° C por 5 minutos. La figura 4.27 exhibe la micrografía de la fractura y también aparece las zonas que fueron analizadas. Así mismo en la tabla 4.15 se presentan los resultados obtenidos del análisis químico.

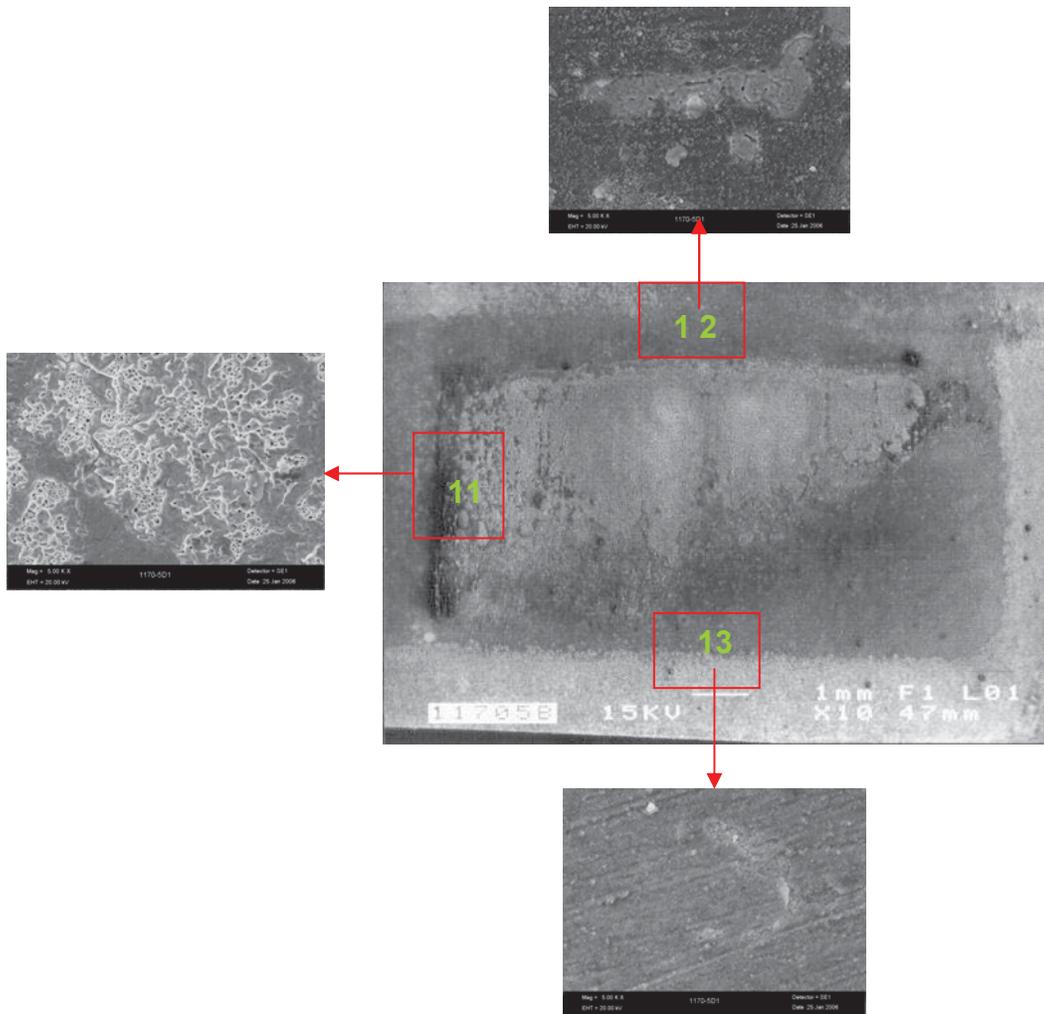


Figura 4.27 Imagen de la fractura a 1170° C por 5 minutos después de la prueba mecánica de tensión al corte, correspondiente a la parte opuesta de la muestra.

Tabla 4.15 Resultados por EDS de la fractura del sistema Al 316L/Cinta/ Al 316L a 1170° C por 5 minutos, después de la prueba de tensión al corte, correspondientes a la parte opuesta de la muestra.

CUANTIFICACIÓN DE ELEMENTOS (% ATOMICO)					
Zona	Si	Cr	Fe	Ni	Mn
11	5.18	11.99	41.62	41.21	-
12	5.56	40.45	36.38	10.27	7.35
13	10.88	48.31	33.83	-	6.98

4.4 MEDICIONES ELECTROANALITICAS

Los procesos electroquímicos se encuentran en muchas áreas, tales como las síntesis industriales, los estudios de corrosión, la experimentación fisiológica y la investigación de las baterías, además de las mediciones analíticas. En otras palabras, se hace hincapié en las mediciones que lleven finalmente ya sea a la magnitud o la concentración de las especies químicas.

En este contexto existen tres tipos principales de experimentos electroquímicos y tres clases de dispositivos de control o medición para ponerlos en práctica. Estas tres clases de experimentos son: potenciométricos, galvanoestáticos y potencioestáticos ⁽⁵³⁾.

A continuación, en las tablas 4.16 y 4.17 se presentan los potenciales de corrosión en ambas temperaturas y a los diferentes tiempos.

Tabla 4.16 Potenciales de corrosión a 1105° C.

Temperatura 1105° C	
Tiempo, min.	Ecorr
5	-465mV
10	-460mV
15	-355mV
20	-170mV
40	-355mV

Tabla 4.17 Potenciales de corrosión a 1170° C.

Temperatura 1170° C	
Tiempo, min.	Ecorr
5	-410mV
10	-244mV
15	- 335mV
20	- 240mV
40	- 140mV

En las tablas anteriores se observa que los potenciales de corrosión a la temperatura de 1105° C pasa de -465 mV a -170 mV, así mismo los potenciales a la temperatura de 1170° C van de -410 mV a -140 mV.

El potencial de corrosión para las muestras tratadas a 1105 y 1170° C presenta una tendencia general a ser menos negativos para tiempos de unión prolongados. Las muestras para 5 y 10 minutos presentan potenciales de corrosión más negativos esto es ambas temperaturas. Zaragoza et al ⁽⁵⁴⁾ encontraron que para el caso de muestras de acero inoxidable 316L sumergidas en agua de mar el potencial de corrosión fue en un rango de 20 a 350 mV vs SCE antes de iniciarse la corrosión por rendija. Para el acero inoxidable 316L Oldfirl et al ⁽⁵⁵⁾ reportaron un potencial de corrosión en un rango de -350 a -400 mV vs SCE para el caso de desarrollar corrosión por hendidura en una solución de NaCl 1M. Esto puede sugerir que para las muestras unidas por 5 y 10 minutos desarrollan corrosión por hendidura muy temprana durante el periodo de prueba al abrir un circuito potencial vinculado de manera irregular con la cinta metálica amorfa.

En las siguientes figuras: 4.28 a 4.32 se presentan las fotografías de las muestras en su sección transversal y las curvas de polarización para cada una de las temperaturas de trabajo y de los diferentes tiempos.

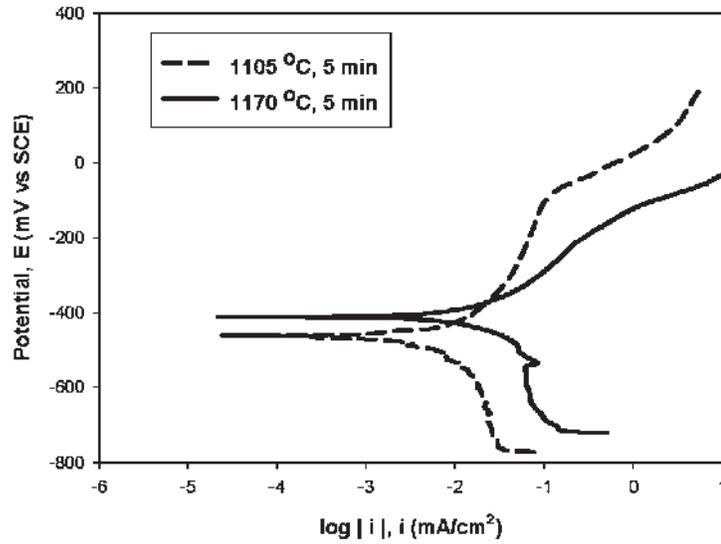
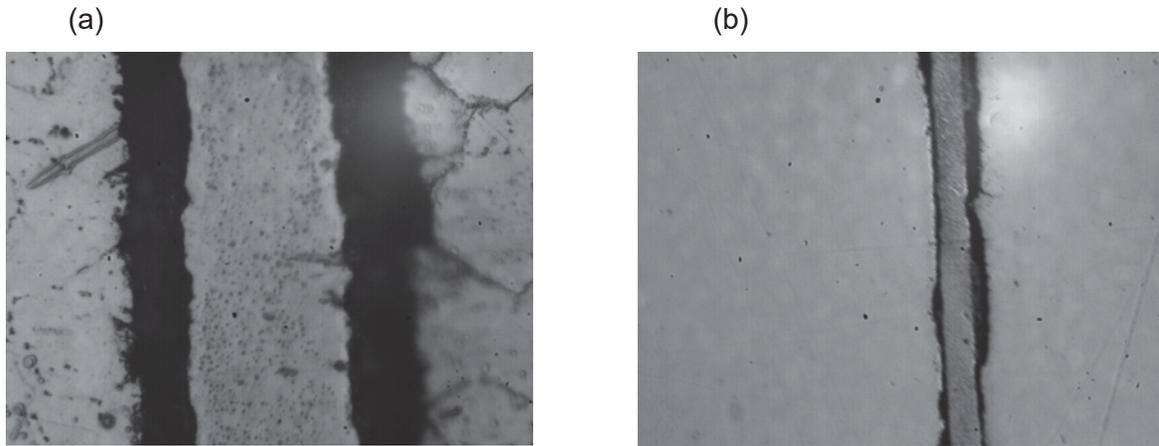


Figura 4.28 Fotografías de la zona de unión para muestras tratadas en una solución 3.5% NaCl: (a) 1105° C por 5 minutos, (b) 1170° C por 5 minutos y (c) curva de polarización para ambas muestras.

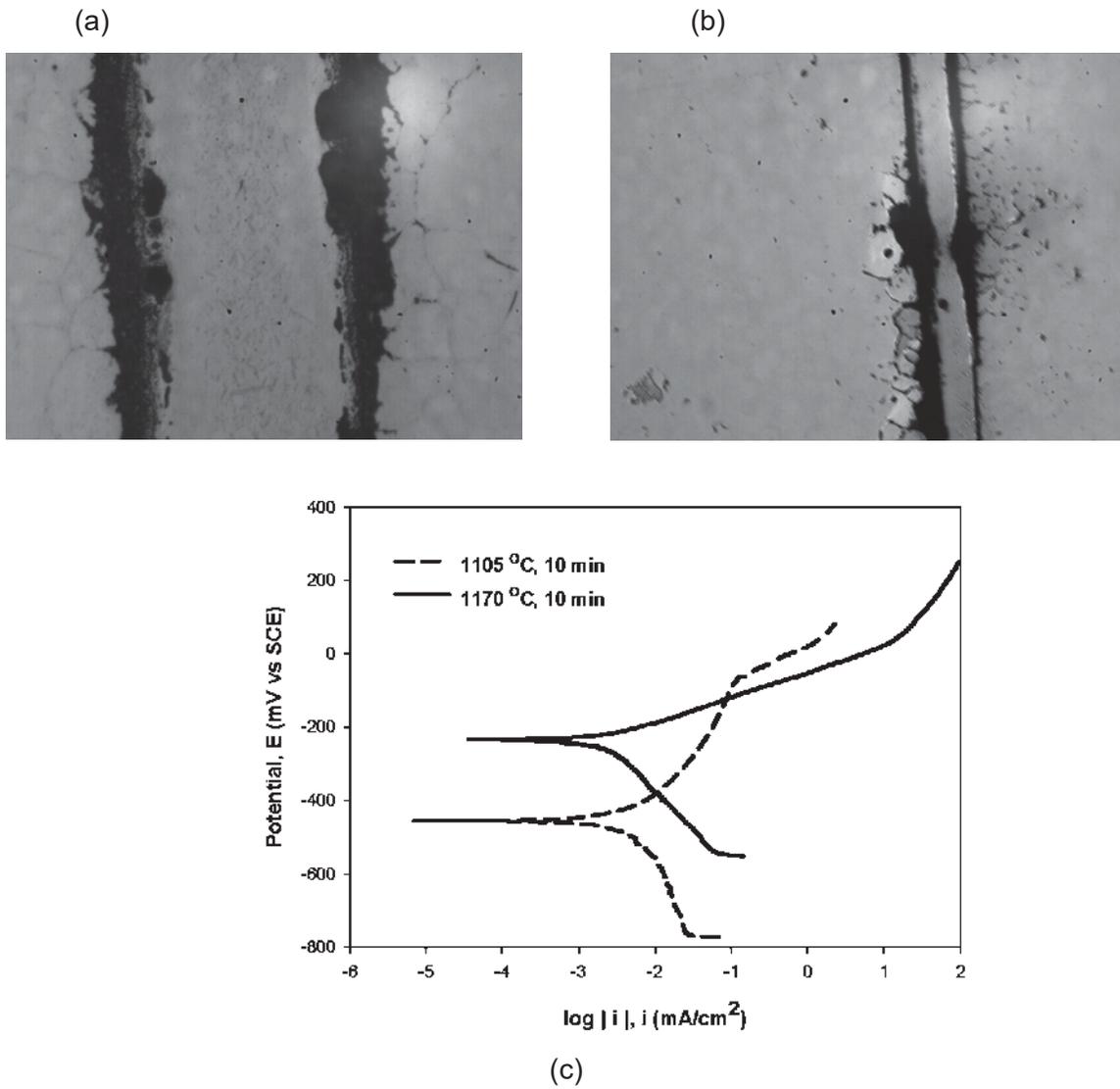


Figura 4.29 Fotografías de la zona de unión para muestras tratadas en una solución 3.5% NaCl: (a) 1105° C por 10 minutos, (b) 1170° C por 10 minutos y (c) curva de polarización para ambas muestras.

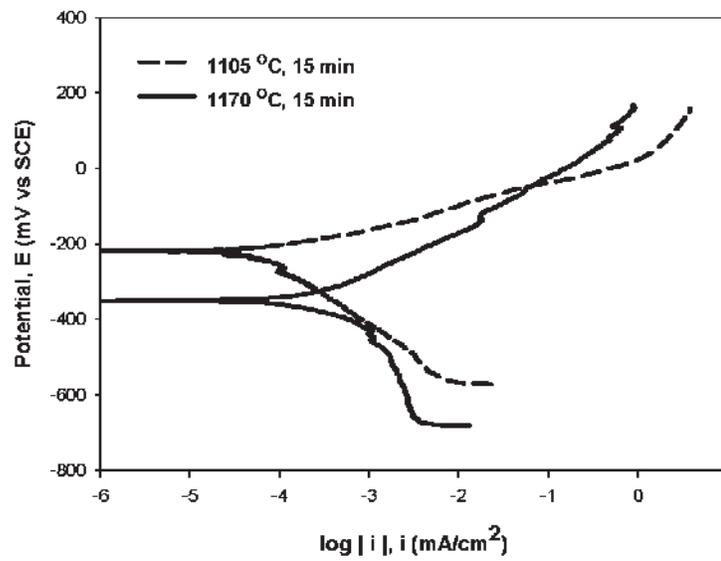
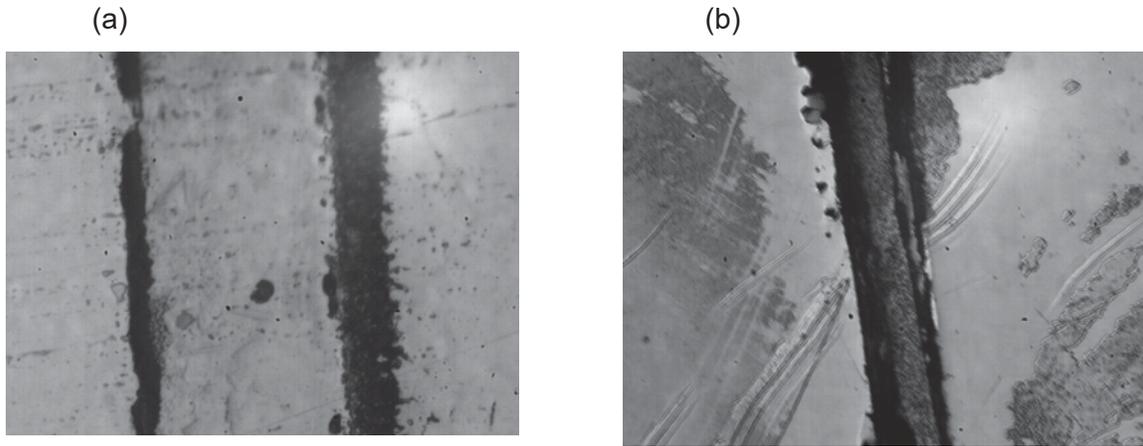


Figura 4.30 Fotografías de la zona de unión para muestras tratadas en una solución 3.5% NaCl: (a) 1105° C por 15 minutos, (b) 1170° C por 15 minutos y (c) curva de polarización para ambas muestras.

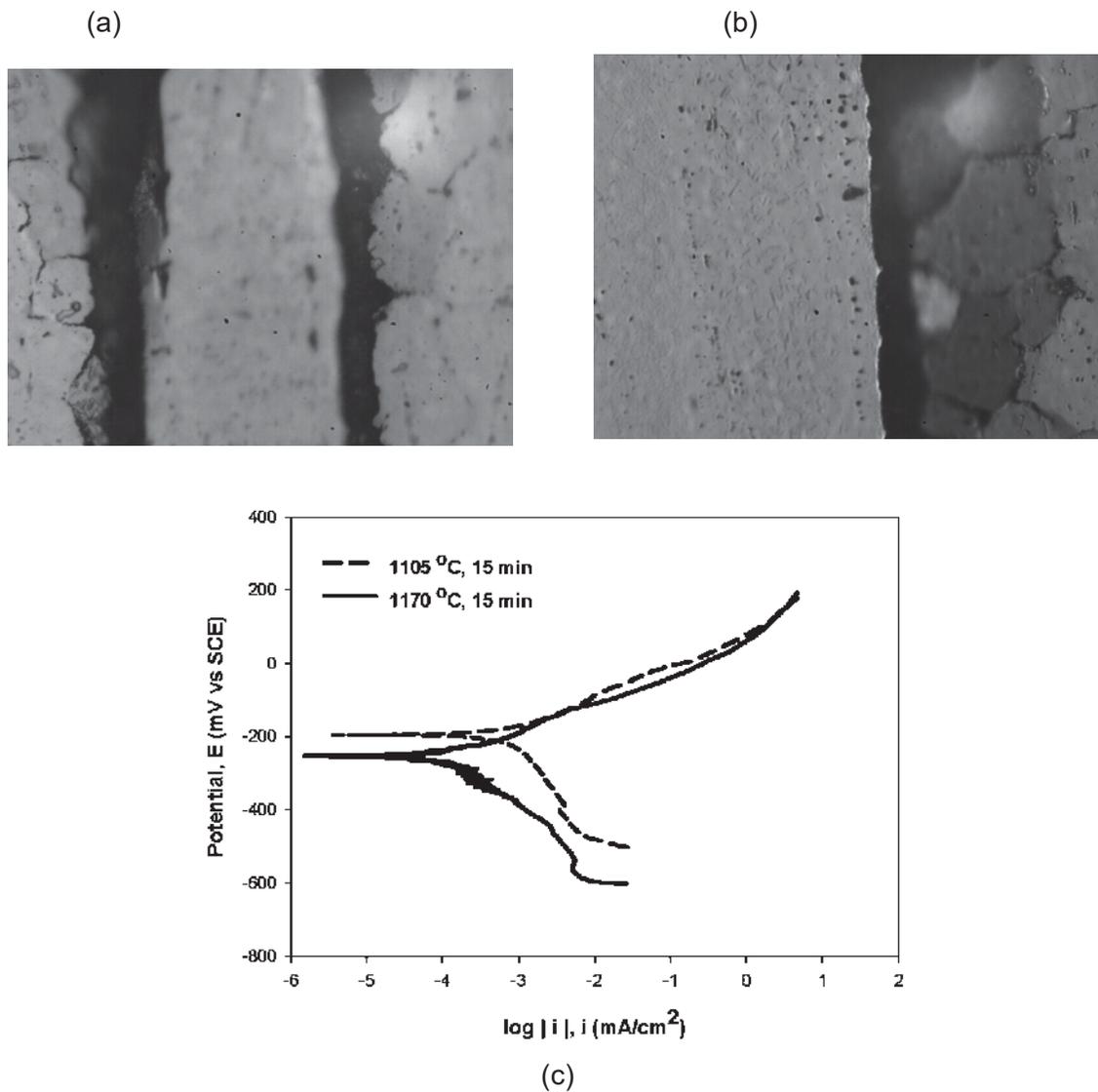


Figura 4.31 Fotografías de la zona de unión para muestras tratadas en una solución 3.5% NaCl: (a) 1105° C por 20 minutos, (b) 1170° C por 20 minutos y (c) curva de polarización para ambas muestras.

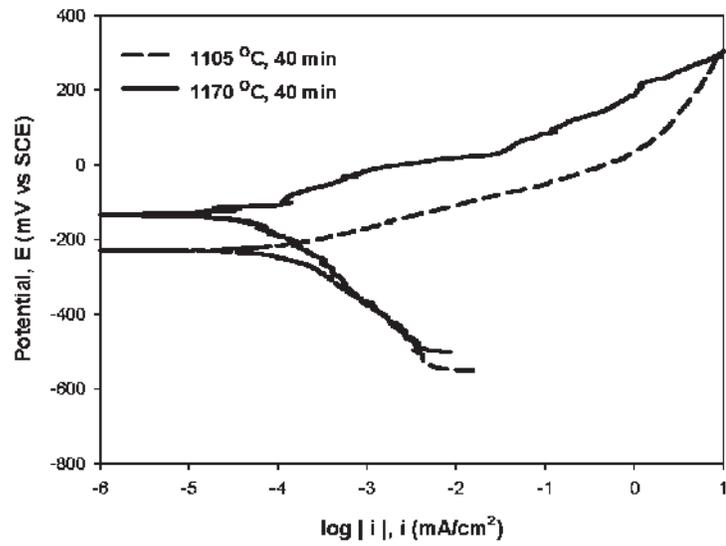
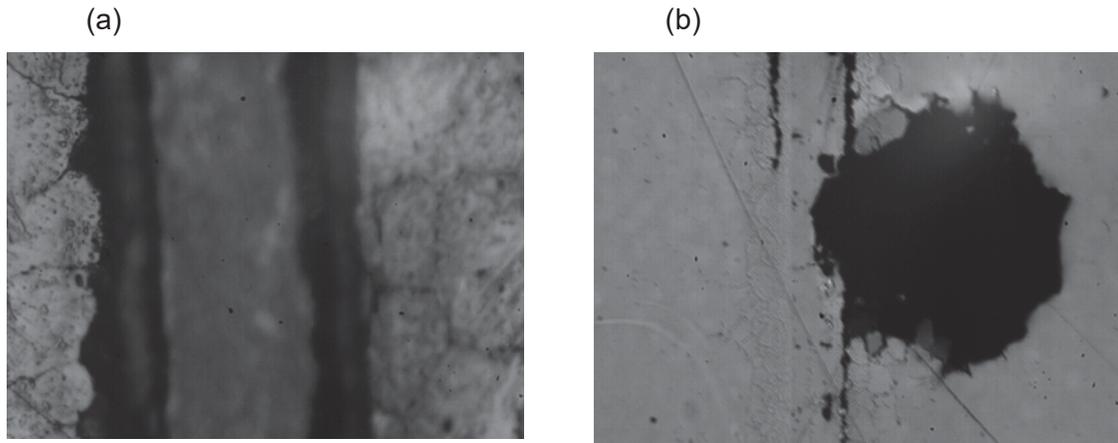


Figura 4.32 Fotografías de la zona de unión para muestras tratadas en una solución 3.5% NaCl: (a) 1105° C por 40 minutos, (b) 1170° C por 40 minutos y (c) curva de polarización para ambas muestras.

Durante la polarización potenciodinámica las muestras unidas a 1105° C por 5 y 10 minutos presentaron un rango de potencial en el cual la superficie de sistema Al 316L / Cinta / Al 316L tiende a tomar una condición pasiva. Esto no es observado en el resto de las muestras unidas a tiempos prolongados en los cuales la polarización anódica induce a una activa disolución. Se sabe que el acero inoxidable 316L presenta una condición pasiva definida en agua de mar artificial, durante la polarización el potencial está en un rango de 0 a 350 mV ⁽⁵⁶⁾.

El resto de las muestras observadas presentan un comportamiento diferente de debido a la no uniformidad y al contacto irregular con la aleación amorfa. La corrosión por hendidura podría formarse después de la disolución preferencial en los sitios de las segundas fases formadas por el tratamiento a lo largo de la línea de la unión. Las curvas de polarización de las muestras tratadas a largo tiempo (15, 20 y 40 minutos) a 1105° C presentan la forma típica de la curva de polarización que también presenta el acero inoxidable en una solución que contiene cloruro con la corrosión por hendidura ⁽⁵⁷⁾.

Para el caso de las muestras tratadas a 1170° C todas las muestras presentaron un comportamiento activo de disolución superior durante la polarización potenciodinámica con respecto a lo registrado. Para las muestras tratadas a 1105° C, salvo para las muestras tratadas a 40 minutos.

En ningún caso las curvas de polarización presentaron una avería potencial y no fue encontrada corrosión por picadura en la superficie del acero inoxidable 316L después de la prueba de polarización potenciodinámica. La corrosión por hendidura en el sistema Al 316L / Cinta / Al 316L se desarrolló en todas las muestras y la disolución preferencial de la cinta se favoreció durante la polarización. Así independiente del tiempo y la temperatura, el sistema desarrolló corrosión por hendidura y una disolución preferencial en la cinta metálica amorfa en una solución 3.5 % de NaCl a temperatura ambiente.

CAPÍTULO: 5

CONCLUSIONES

- Fue posible llevar a cabo las uniones a las temperaturas de 1105 y 1170° C, así como a los diferentes tiempos de unión.
- A la temperatura de 1105° C se muestran resultados favorables a partir de los 10 minutos ya que no se observan islas sin unir, sin embargo existe porosidad remanente alineadas cerca de la interfase.
- Se observa que las uniones a 1170° C se obtiene mayor difusión a partir de los 20 minutos.
- La unión se lleva a cabo mediante la difusión reacción química entre los materiales caracterizándose por una ausencia de porosidad remanente, así como de fisuras en la interfase.
- Se observó que a la temperatura de 1170° C hay una mejor interacción de los elementos.
- A la temperatura de 1105° C se vio afectado el sistema Al 316L / Cinta / Al 316L en la resistencia a la tensión al corte, ya que al aumentar el tiempo la resistencia disminuye, de un valor máximo promedio de 74.25 MPa por 15 minutos a 63.70 MPa por 20 minutos y 71.72 MPa por 40 minutos.

- En las uniones realizadas a 1170° C la resistencia al corte incremento con respecto al tiempo de unión, ya que el valor máximo promedio fue de 78.70 MPa a 40 minutos, para tiempos menores se registraron valores mayores a 40 MPa.
- Los valores máximos en la prueba de resistencia al corte se puede asociar a la interacción del acero con la cinta metálica al aumentar la temperatura, el valor máximo fue de 84.26 MPa a 1170° C por 40 minutos.
- Se observó que la fractura se da en la interfase de unión y no en el acero, debido a los residuos en la interfase.
- El sistema Al 316L / Cinta amorfa / Al 316L no se comporta como una pieza unificada desde el punto de vista electroquímico, debido a lo no uniformidad y al contacto irregular con la aleación amorfa.
- Independientemente del tiempo y temperatura de unión, el sistema desarrolló disolución preferencial por la formación de par galvánico entre la cinta y el acero inoxidable 316L, la cual se aceleró cuando se sometió a polarización potenciodinámica en una solución de 3.5% de NaCl. El ataque preferencial indujo corrosión por hendiduras a temperatura ambiente.

REFERENCIAS

- 1) Luborsky, F.E. (1983), "Amorphous Metallic Alloys". En: Amorphous Metallic Alloys. Ed. F.E. Luborsky. Butterwords Monographs in Materials, London, U.K. pp. 1-7.
- 2) Boll, R. y Warlimont, H. (1981), Applications of Amorphous Magnetic Materials in Electronics. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag – 17 No. 6, pp. 3053 – 3058.
- 3) Mohr, K. y Shirotsugi, T. (1983) Pulse-Output Type Magnetic Sensors Using Plastically Helical Amorphous Ribbons. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-19 No. 5 pp. 2151 – 2153.
- 4) Harry, W. Ng (1989) Amorphous Core Transformers show Promise. IEEE Electrical Insulation Magazine, 5 (3), pp. 36 – 37.
- 5) DeCristofaro, N. (1998) Amorphous Metals in Electric –Power Distribution Applications. MRS Bulletin, 23 (5), pp. 50 – 56.
- 6) Hashimoto, K. y Masumoto, T. (1983). "Corrosion Properties of Amorphous Alloys". En: Glassy Metals: Magnetic, Chemical and Structural Properties. Ed. R. Hasegawa. CRC Press, pp. 236 – 262.

- 7) Lieberman, H.H., Grant, N.J. y Ando, T. (1998) "Selected Examples of Applications". En: Elements of Rapid Solidification. Ed. M.A. Otoni. Springer. Germany, pp. 217 – 236.
- 8) Rabinkin, A., Wenshi, E. y Ribaudó, A. (1998) Brazing Stainless Steel Using a New MBF Series of Ni-Cr-B-Si Amorphous Brazing Foils. Welding Research Supplement, pp. 66s – 75s.
- 9) Masumoto, T., "High mechanical strengths of rapidly solidified $Al_{93}Mn_5Ce_1M_1$ (M \in transition metal) alloys containing nanoscale quasi-crystalline phase as a main component", Mater. Sci. Eng. A181-182 (1994), pp. 845 – 849.
- 10) W. L. Johnson, MRS Symp. Proc. 554 (1999) 311.
- 11) A. Inoue, Bulk Amorphous Alloys, Preparation and Fundamental Characteristics, Trans Tech Publications, NH, 1998, pp. 1 – 37.
- 12) Kawamura Y., Shibata T., Inoue A., Masumoto T., "Workability of the supercooled liquid in the $Zr_{65}Al_{10}Ni_{10}Cu_{15}$ bulk metallic glass", Acta Mater. 46 (1998) pp. 253 – 263.
- 13) Kawamura Y., "Liquid phase and supercooled liquid phase welding of bulk metallic glasses", Mater. Sci. Eng. A 375 – 377 (2004), pp. 112 – 119.
- 14) Kawamura Y., Shoji T., and Ohno Y., "Welding technologies of bulk metallic glasses", J. Non – Cryst. Solids 317 (2003) pp. 152 – 157.
- 15) Kawamura Y., Ohkubo T., Shoji S., and Hono K., "Nanostructure analysis of friction welded Pd – Ni – P / Pd – Cu – Ni- P metallic glass interface", Scr. Mat. 53 (2005) pp. 493 – 497.

- 16) Kawamura Y., Ohno Y., “Spark welding of $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$ bulk metallic glasses”, *Scr. Mat.* 45 (2001) pp. 127 – 132.
- 17) Yokoyama Y., Abe N., Fukaura K., Shinohara T., and Inoue A., “Electron – beam welding of $Zr_{50}Cu_{30}Ni_{10}Al_{10}$ bulk glassy alloys”, *Mat. Sci. Eng. A* 375 – 377 (2004) pp. 422 – 426.
- 18) Shoji T., Kawamura Y., and Ohno Y., “Friction welding of bulk metallic glasses to different ones”, *Mat. Sci. Eng. A* 375 - 377 (2004) pp. 394 – 398.
- 19) Kawamura Y., Chiba A., en: A. Chiba, S. Tanimura, K. Hokamoto (Eds.), *Impact Engineering and Application*, Elsevier Science, Oxford, UK, 2001, p. 273.
- 20) Kagao S., Kawamura Y., and Ohno Y., “Electron – beam welding of Zr – based bulk metallic glasses”, *Mat. Sci. Eng. A* 375 – 377 (2004) pp. 312 – 316.
- 21) R. W. Messler, Jr., *Joining of Advanced Materials*, Butterworth-Heinemann, USA, 1993.
- 22) Künding A. A., Ohnuma M., Ping D.H., Ohkubo T., Hono K., “In situ formed two – phase metallic glass with surface fractal microstructure”, *Acta Mat.* 52 (2004) pp. 2441 – 2448.
- 23) García Naumis Gerardo, “Nuevas tecnologías que surgen del desorden: los materiales amorfos”, *Ciencias*, vol. 54, p.4 (2003).
- 24) <http://cipres.cec.uchile.cl/~mpilleux/id42a/Trabajos/1Amorfos/SolidosAmorfos.html>

- 25) D. Raskin and C. H. Smith, "Applications of amorphous metals: progress and prospects" en *Amorphous Metallic Alloys*, Ed. Luborsky, F.E., Butterworths, London, 1983, pp. 381-400.
- 26) Dixmier J., Doi K., and Guinier A., en "Physics of Noncrystalline Solids", Edited by J.A. Prins (North Holland, Amsterdam, 1965) p. 67.
- 27) Takayama S., "Review Amorphous Structures and their formation and stability", Materials Research Corporation, Morristown, N.J., USA.
- 28) Anantharaman, T.R. and Suryanarayana, C., *Rapidly Solidified Metals*, Trans. Tech. Publications, Switzerland-Germany-USA, 1987.
- 29) Hasegawa, R., *Glassy Metals: magnetic, chemical and structural properties*, CRC Press, 1983.
- 30) Kawashima, A., Hashimoto, K., and Masumoto, T., "Stress corrosion craking of amorphous iron base alloy", *Corros. Sci.*, 16, 935, 1976.
- 31) Nagumo, M. and Takahashi, T., "Hydrogen embrittlement of some Fe-base amorphous alloys", *Mater. Sci. Eng.*, 23, 257, 1976.
- 32) Viswanadham, R. K., Green, J. A. S., and Montague, W. G., "Hydrogen embrittlement of an Fe-based amorphous metal", *Scr. Metall.*, 10, 229, 1976.
- 33) FACTA. *Enciclopedia Sistemática*, Tomo 6, año 1965, Ediciones RIALP. S.A. Preciados, 44, pp. 42-52.
- 34) Lula, R. A. *Stainless Steel, From an Introduction to stainless steel* by J. Gordon Parr and Albert Hanson, American Society for metals, 1986, Editorial Carnes Publication Services, Inc., pp. 1-12, 60-71.

- 35) Sedriks, A. John, Corrosion of Stainless Steels, Second Edition 1996, Editorial A Wiley-Interscience Publication John Wiley and sons, Inc., pp. 13-21, 28-31, 67-70.
- 36) <http://www.prodmet.com/inoxidables/inoxidable.htm>
- 37) <http://www.industriaxxi.etsii.upm.es/revista/0803.pdf>
- 38) <http://www.materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-11/PDF./cap-41.pdf>
- 39) R. Alonso Roberto, Corrosión, www.AstillerobluewaterboatsArgentina-Corrosion.htm
- 40) Jones, A. D., Principles and prevention of corrosion, Editorial Mawell Mc Millan, Internacional edition, 1992.
- 41) Fontana, M. G., Corrosion Engineer Board, Tercera Edición, 1986.
- 42) Silva Gundelach Carmen, Seminario: Diagnóstico y Soluciones a la corrosión en la industria. 30,31 de Marzo y 1 de Abril 2005, Santiago de Chile, Chile.
- 43) H. Pope Daniel, Microbiologically Influenced Corrosion in the Twentieth Century and where do we go from here (Bioindustrial Technologies, Inc. Bayfield, CO. 81122). Paper No. 00402 NACE International 2000.
- 44) http://www.ua.es/es/investigacion/sti/imagenes/analisis_termico.htm
- 45) <http://www.fisica.uh.cu/bibvirtual>

- 46) Vander Voor George F., Metallography Principles and Practice. The Materials Information Society (ASM), 1ª Edición 2000.
- 47) Rabinkin A., Wenski E., and Ribaudó A., "Brazing Stainless Steel Using a New MBF-Series of Ni-Cr-B-Si Amorphous Brazing Foils", Welding Research Supplement, 1998, pp. 66-75.
- 48) Polanco R., De Pablos A., Miranzo P., Osendi M.I., "Metal – ceramic interfaces: joining silicon nitride-stainless steel", Applied surface science 238 (2004) 506-512.
- 49) <http://www.metalica.com.mx/inox/propiedadesinox.html>
- 50) <http://www.metglas.com>
- 51) Wang Yao-Wen, Zhao Peng-Sheng, and Zhang Yong-Qing, "Joining Ceramics to metals by abnormal glow discharge plasma", J. of the Ceramic Society of Japan, 113 (6) 2005, pp. 409-412.
- 52) Jicai Feng, Lixia Zhang, "Interface structure and mechanical property of the brazed joint of TiC cermet and steel", J. of the European Ceramic Society, Vol. 26, 7, 2006, pp. 1287-1292.
- 53) Basil H. Vassos, Galen W. Ewing, Electroquímica analítica, Editorial Limusa Noriega Editores, año 1998, pp. 17-25, 194, 281.
- 54) Zaragoza A., Orozco R., (1999) CORROSION 99, paper No. 320.
- 55) Oldfirl J., Sutton W., (1978), British Corrosion Journal, Vol. 13, pp. 104.

- 56) González Sánchez Jorge Antonio, (2002), PhD Thesis, Sheffield Hallam University. UK.
- 57) Jakobsen P., Maahn E., (2001), Corrosion Science, Vol. 43, pp. 1693-1709.