



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

***ESTUDIO PARA EVALUAR Y CALIFICAR EL
PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA DEL ACERO
SA-312 TP 347***

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO INDUSTRIAL

PRESENTA:

IVÁN LEÓN CASTRO

DIRECTOR:

DR. JULIO ALBERTO JUÁREZ ISLAS



México, D.F. Noviembre 2013

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, por haberme formado como profesionista y como ser factor de cambio en nuestra sociedad.

A la Facultad de Ingeniería, en donde estos últimos años me adquirí la formación profesional que me permite actualmente desempeñarme en el sector industrial, aplicando los conocimientos técnicos y habilidades adquiridas a lo largo de cinco años y a su vez, donde aprendí la máxima de solucionar la infinidad de problemas del sector industrial de nuestro país de la manera más eficiente y ética.

A mi director de tesis, el **Dr. Julio Alberto Juárez Islas**, quien me apoyó en la designación del tema y el desarrollo de este trabajo, compartiéndome su experiencia y conocimientos referentes al estudio de los materiales metálicos. Gracias por destinarle tiempo al desarrollo de este proyecto, lo cual me ha permitido concluirlo.

A mis sinodales: al **Ing. Jesús Antonio Patiño Ramírez**, al **M.C. Ubaldo Eduardo Márquez Amador**, al **Dr. Víctor Hugo Jacobo Armendáriz** y finalmente al **M.I. Ricardo Torres Mendoza**, por tomarse el tiempo de revisar y analizar este trabajo y hacerme sus observaciones, mismas que lo han mejorado y enriquecido.

DEDICATORIAS

A mis padres **Fausta Castro y Andrés León**, por haberme apoyado en toda mi trayectoria escolar y por confiar en mi y respaldar la decisión de estudiar en esta casa de estudios. Por constituir el soporte material y moral que están detrás de este trabajo que representa la culminación de una etapa fundamental como persona y como profesionalista. Este trabajo es una retribución representativa a todo el esfuerzo que realizaron por hacer esto posible, muchas gracias.

A mi familia, por convertirse en la motivación que me hizo sentir el compromiso moral de terminar esta etapa y seguir siendo su referente en sus aspiraciones profesionales.

A **Ruthy Armenta**, por darme la oportunidad de conocerte, por ser la motivación especial en estos últimos meses para terminar este proceso, por comprenderme y acompañarme en estos momentos tan importantes de mi vida. Gracias por estar cerca de mí y compartirme tus sentimientos.

Una dedicatoria especial para **Gaby Toxqui**, gracias por formar parte de esta etapa tan especial e importante de mi vida, por brindarme la compañía y el amor que siempre me diste, por comprenderme y apoyarme en todos los momentos difíciles de esta carrera, por darle un toque de felicidad y por confiar en mí. Esto es sólo un pequeño reconocimiento a ti, por compartir conmigo tu tiempo, por hacer mi vida diferente, por hacer que cada jornada ardua en las aulas tuviera un desenlace feliz en cada fin de semana. Por todos aquellos sacrificios que hiciste para estar aquí, por ser una persona respetable y valiente, por compartirme tus experiencias y por todos los momentos inolvidables que no tendré cómo pagar, de corazón, muchas gracias *florecita*.

ÍNDICE

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVO GENERAL

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

HIPÓTESIS

JUSTIFICACIÓN

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 Clasificación, propiedades y aplicaciones de los aceros inoxidables.

1.1.1 Aceros inoxidables martensíticos

1.1.2 Aceros inoxidables ferríticos

1.1.3 Aceros inoxidables austeníticos

1.1.4 Aceros inoxidables dúplex.

1.1.5 Aceros inoxidables endurecibles por precipitación

1.2 La familia de los aceros inoxidables austeníticos

1.2.1 Acero inoxidable 347

1.3 Especificación del procedimiento de soldadura (WPS)

1.3.1 Procesos de soldadura.

1.4 Soldadura por arco eléctrico con electrodo de tungsteno y gas (GTAW)

1.4.1 Características del proceso.

1.4.2 Equipo

1.4.3 El gas de protección.

1.4.4 Los electrodos.

1.4.5 El metal de aportación.

1.5 Soldadura por arco eléctrico con alambre sólido y gas (SMAW).

1.5.1 Características del proceso.

1.5.2 Equipo

1.6 Procedimiento experimental

1.6.1 Microscopio electrónico de barrido.

CAPÍTULO II. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Análisis químico del acero por espectrometría de masas.

2.2. Soldadura del acero inoxidable 347

2.3. Corte de muestras

- 2.4. Tratamientos térmicos del acero inoxidable 347.
 - 2.4.1 Etapa de Relevado de Esfuerzos-THERMICA MEXICANA (P-J3).
 - 2.4.2 Etapa de Annealing por THERMICA MEXICANA (P-J4).
 - 2.4.3 Relevado de Esfuerzos (P-J5)
 - 2.4.4 Relevado de esfuerzos-Solubilidad de carburos-Estabilidad de fase (P-J6).
- 2.5 Evaluación microestructural, mecánica y de acumulación de esfuerzos.
 - 2.5.1 La evaluación de la microestructura en el cordón de soldadura
 - 2.5.2 Difracción de rayos-x
 - 2.5.3 Pruebas mecánicas de tensión

CAPÍTULO III. EVALUACIÓN DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS.

- 3.1 Análisis químico de probetas bajo estudio.
- 3.2 Soldadura de probetas de dimensiones 30X15X5 cm
- 3.3 Corte de probetas de dimensiones 30X15X5 cm
- 3.4. Tratamientos térmicos a probetas P-J3, P-J4, P-J5 y P-J6.
 - 3.4.1 Tratamiento térmico de relevado de esfuerzos Thermica Mexicana (P-J3).
 - 3.4.2 Tratamiento térmico de annealing Thermica Mexicana (P-J4).
 - 3.4.3 Tratamiento térmico de relevado de esfuerzos UNAM (P-J5).
 - 3.4.4 Tratamiento térmico de relevado de esfuerzos, solubilidad de precipitados y estabilidad de fase UNAM (P-J6).

CAPÍTULO IV EVALUACIÓN MICROESTRUCTURAL Y MECÁNICA.

- 4.1 Evaluación microestructural
- 4.2 Análisis microestructural del cordón de soldadura
- 4.3 Propiedades mecánicas a temperatura ambiente y a 450°C.

Análisis de beneficios en la productividad de la Refinería.

CONCLUSIONES
REFERENCIAS
ANEXOS

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En inspecciones de ingeniería de la Descarga de Bomba del Reactor DC de la Planta Catalítica de la Refinería Miguel Hidalgo, de Tula Hidalgo, se han detectado grietas las cuales, se inician en el cordón de soldadura. Esto genera la interrupción de la operación de la planta catalítica, por lo que se lleva a cabo un estudio sistemático con el propósito de evaluar y calificar el procedimiento de soldadura de un acero inoxidable del tipo 347, de la descarga de Bomba del Reactor DC, para lo cual es necesario estudiar a profundidad las causas del agrietamiento en el material.

OBJETIVO GENERAL: Evaluar y calificar el procedimiento de diseño de soldadura de un acero inoxidable SA 312, del reactor DC de la de planta catalítica de la refinería Miguel Hidalgo en Tula, Hidalgo.

OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Describir la clasificación de los aceros inoxidables haciendo la diferencia entre ellos y estableciendo los parámetros básicos de composición y propiedades mecánicas y físico-químicas para
- Describir los procesos de soldadura utilizados, contemplando los materiales a utilizar, el equipo, material de aporte y cualidades de la soldadura.
- Establecer las relaciones existentes entre el tipo de microestructura del acero inoxidable bajo estudio y sus propiedades mecánicas.

JUSTIFICACION:

Los elevados costos en los que se incurre por el paro del catalizador, urgen a la búsqueda de un procedimiento de soldadura eficiente como medida preventiva ante las consecuencias que implican las fracturas en el material del Reactor, las cuales tienen que ver directamente con costos de producción elevados.

HIPOTESIS

Es posible obtener un procedimiento de soldadura eficiente para el acero inoxidable SA-312 TP347 a partir de un análisis integral de microestructura, tratamientos térmicos y propiedades mecánicas que cumplan con las características necesarias para evitar fracturas en el Reactor DC 302.

INTRODUCCIÓN.

Los aceros inoxidable químicamente estabilizados como el 321 o el 347 son comúnmente utilizados en tratamientos a base de hidrógeno y en refinerías complejas de hidrocarburos debido a su resistencia a la corrosión en altas temperatura. Sin embargo, los aceros inoxidable austeníticos son susceptibles al Stress Corrosion Cracking (SCC) posterior al proceso de soldadura. Este efecto se debe principalmente a la formación de Cromo en la zona afectada por el calor de la junta de soldadura debido a la precipitación de carburos de Cromo en los límites de grano, esto durante su fabricación u operación.

El presente estudio, constituye un análisis integral de las variables que afectan al cordón de soldadura del reactor DC 302 de la Refinería Miguel Hidalgo en Tula, el cual presenta fracturas frecuentes que impiden su operación. La recurrencia de este problema induce al estudio para evaluar el procedimiento de soldadura del acero inoxidable del cual está fabricado

En el primer capítulo se presenta el marco teórico sobre el que se fundamenta el estudio. Inicialmente se hace referencia a la clasificación de los aceros inoxidable, propiedades y aplicaciones. En esta parte se hace énfasis en los aceros inoxidable austeníticos, clasificación a la que pertenece el material del reactor en estudio. Posteriormente se hace mención de los procedimientos de soldadura utilizados en la evaluación, sus características principales y los requerimientos para su aplicación.

En el segundo capítulo, se presenta la metodología empleada para el sometimiento de las probetas de acero a evaluaciones microestructurales, de tratamientos térmicos y de propiedades mecánicas. Se plantea el procedimiento técnico del estudio y el equipo utilizado para realizar las pruebas, así como las condiciones físicas requeridas.

En el tercer capítulo se presenta el resultado de las evaluaciones de tratamientos térmicos, se hace énfasis en efecto derivado de las variaciones de temperatura en

las muestras, a fin de determinar el cambio en la microestructura y su relación con las propiedades mecánicas.

En el cuarto capítulo se presenta el resultado de las evaluaciones mecánicas y microestructurales, se resalta la relación entre el tipo de microestructura de cada probeta con respecto a las propiedades mecánicas resultantes después de aplicar los tratamientos anteriormente señalados.

Finalmente se presentan las conclusiones de este estudio, las cuales constituyen un parámetro para la modificación del procedimiento de soldadura en el Reactor y terminar con el problema.

ANTECEDENTES

“Análisis de falla de una muestra con fractura de acero inoxidable SA-312 TP 347, proveniente de la soldadura del reactor DC-3102, de la bomba ebuladora”.

Se lleva a cabo un análisis de una muestra con fractura de acero inoxidable SA-312 TP 347, proveniente de la soldadura del Reactor DC-3102, de la bomba ebuladora. Este tipo de fractura ha sido evaluada y sugerido que la causa probable de falla es debido a stress corrosión cracking (S.C.C), ya que este tipo de corrosión forma grietas profundas en el material y es causado por la presencia de cloruros en el fluido de proceso a temperaturas $>50^{\circ}\text{C}$, cuando el material está sujeto a un esfuerzo de tensión, incluyendo tensiones residuales las cuales pueden acumularse hasta alcanzar el esfuerzo de cedencia.

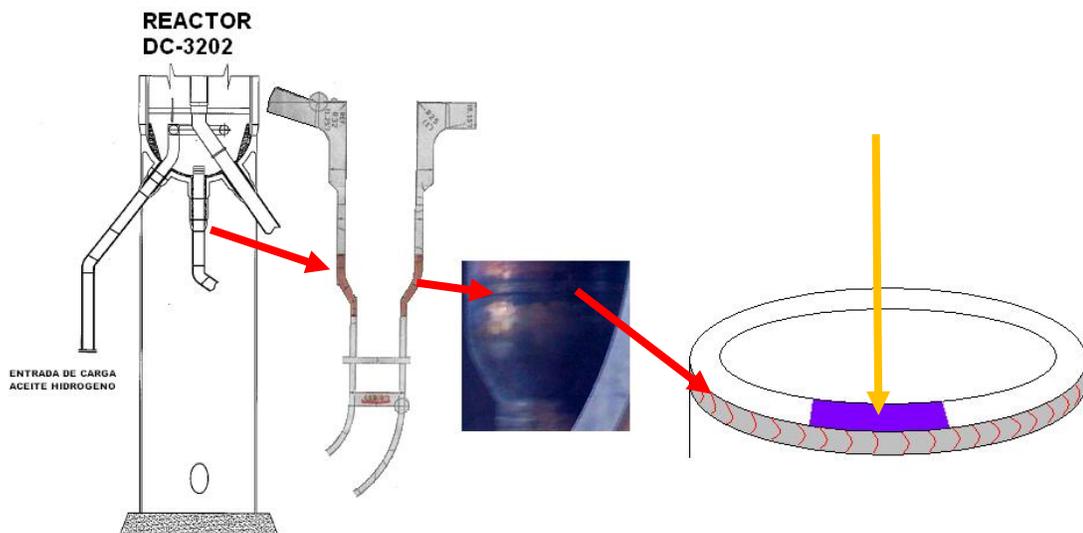


Fig.1 Diagrama esquemático de la zona bajo estudio en donde se muestra la procedencia del cordón de soldadura de la bomba ebuladora en donde se detectó la presencia de grietas. La flecha amarilla indica la procedencia de la muestra bajo estudio.

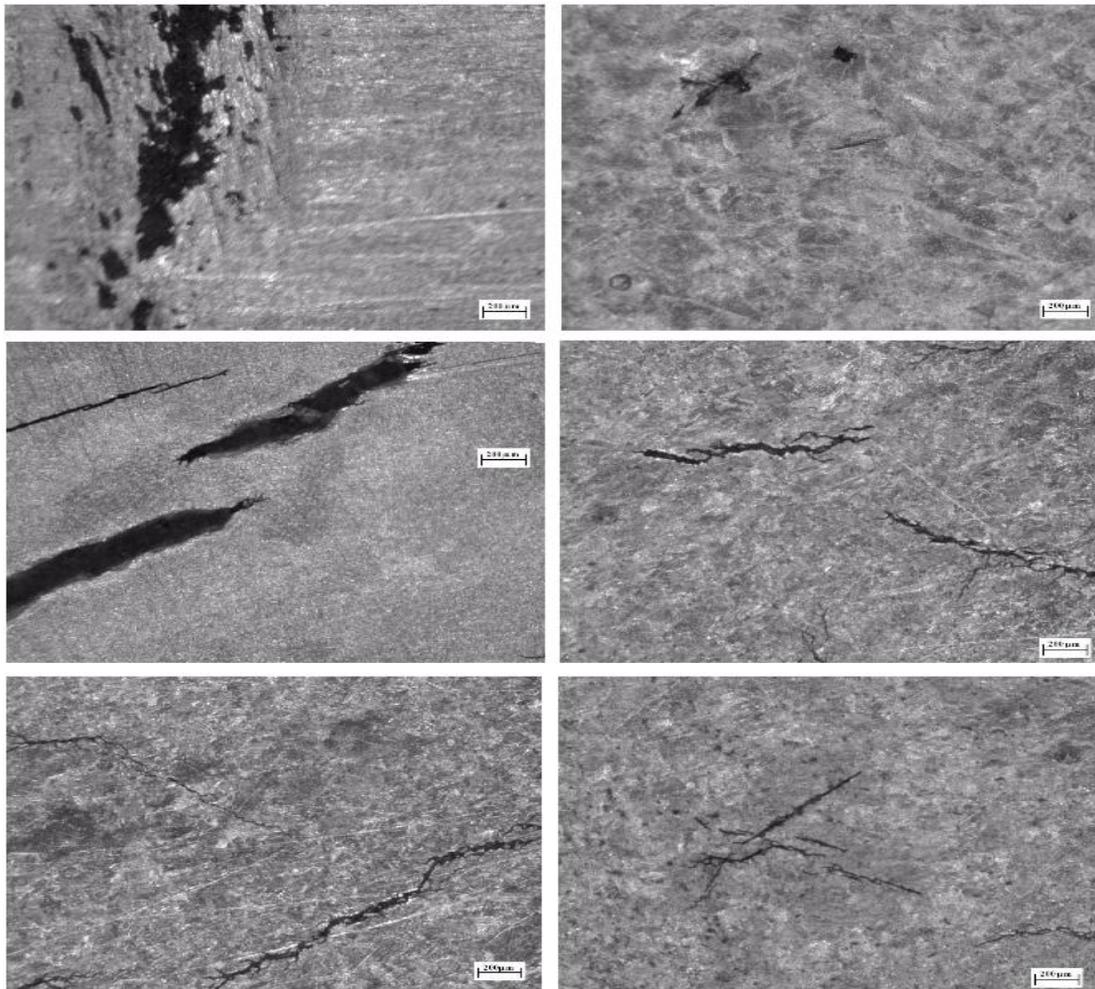


Fig. 2 Grietas en acero inoxidable SA-312 TP 347 provenientes de regiones de la soldadura del Reactor DC-3102, de la bomba ebuladora obtenidas mediante la técnica de microscopía óptica de campo en mayo de 2010.

Origen de la falla

La figura 2 muestra una serie microestructuras obtenidas mediante la técnica de electropulido y microscopía óptica de campo del acero inoxidable SA-312 TP 347 provenientes de regiones de la soldadura del Reactor DC-3102, de la bomba ebuladora, en donde se observan grietas presentes del tipo intergranular y cuya presencia fue atribuida a stress corrosión cracking, en el año 2010.



Fig. 3 Muestra bajo estudio.

La figura 3 muestra uno de los cortes longitudinales, los cuales se llevaron a cabo con un espesor de corte de 1 mm, hasta que se detectó la falla.

Tabla 1. Composición química de la muestra bajo estudio (en % en peso).

Elemento	C	Mn	P	S	Cr	Ni	Nb+Ta	Ti	N	Fe
% en peso	0.077	1.98	0.034	0.020	18.92	12.18	0.90	0.010	50ppm	Bal.

La Tabla 1 muestra la composición química de este acero bajo estudio obtenido mediante la técnica de espectrometría de masas y la cual está dentro del rango de composición del acero inoxidable SA-312 TP 347.

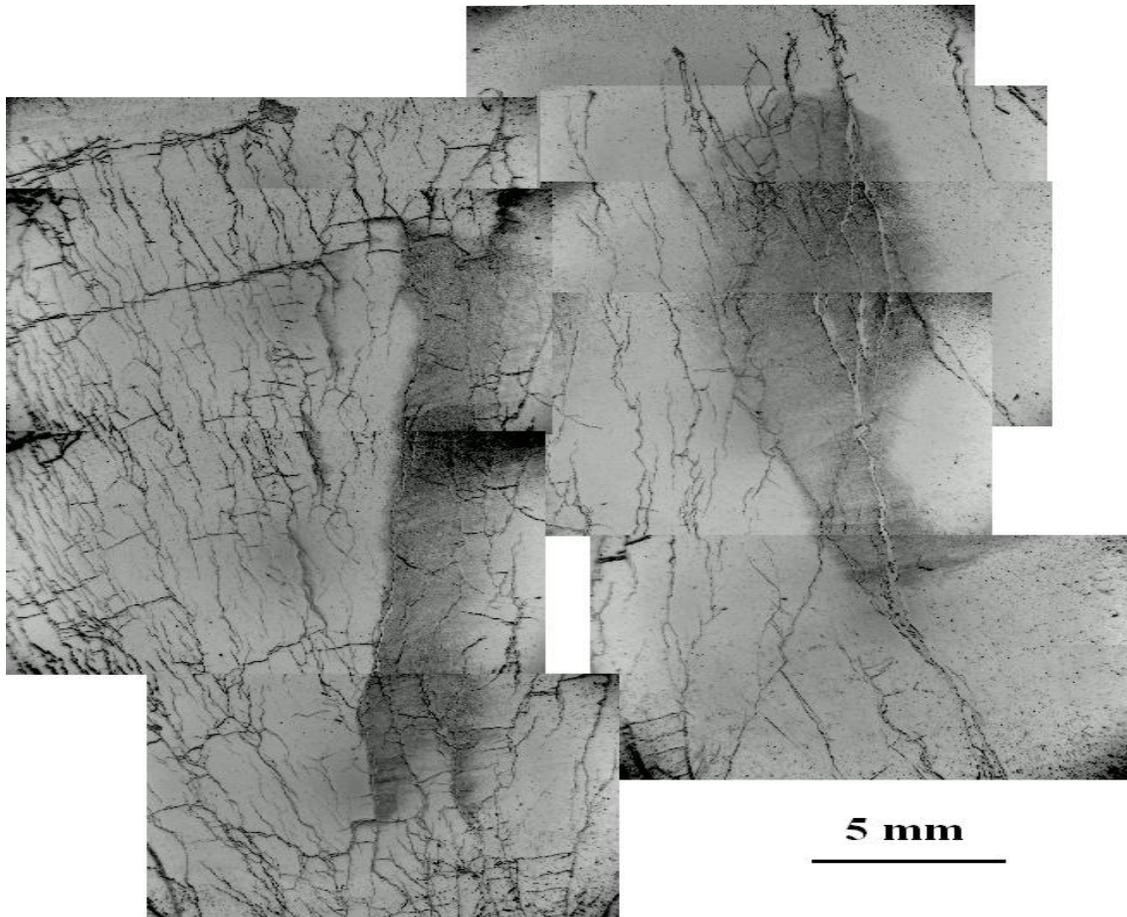


Fig. 4 Grietas observadas en el cordón de soldadura del acero inoxidable SA-312 TP 347 provenientes de regiones del Reactor DC-3102, de la bomba ebuladora.

La figura 4 muestra un corte longitudinal del cordón de soldadura del acero inoxidable SA-312 TP 347 provenientes de regiones del Reactor DC-3102, de la bomba ebuladora, en donde se observa por primera vez el origen de la falla, la cual inicia a una altura aproximada de 3.6 cm del diámetro interior del cordón de soldadura. Como se puede observar, la falla ocurre en regiones donde se tiene la presencia de burbujas generadas por la nucleación y crecimiento de gas atrapado en el líquido durante el proceso de soldadura. La solubilidad del gas es mayor en

el líquido que en el sólido y cuando ocurre la solidificación del metal, el gas en exceso nuclea y crece en forma de burbuja, la cual queda atrapada en el metal sólido, generando lo que comúnmente se conoce como porosidad.

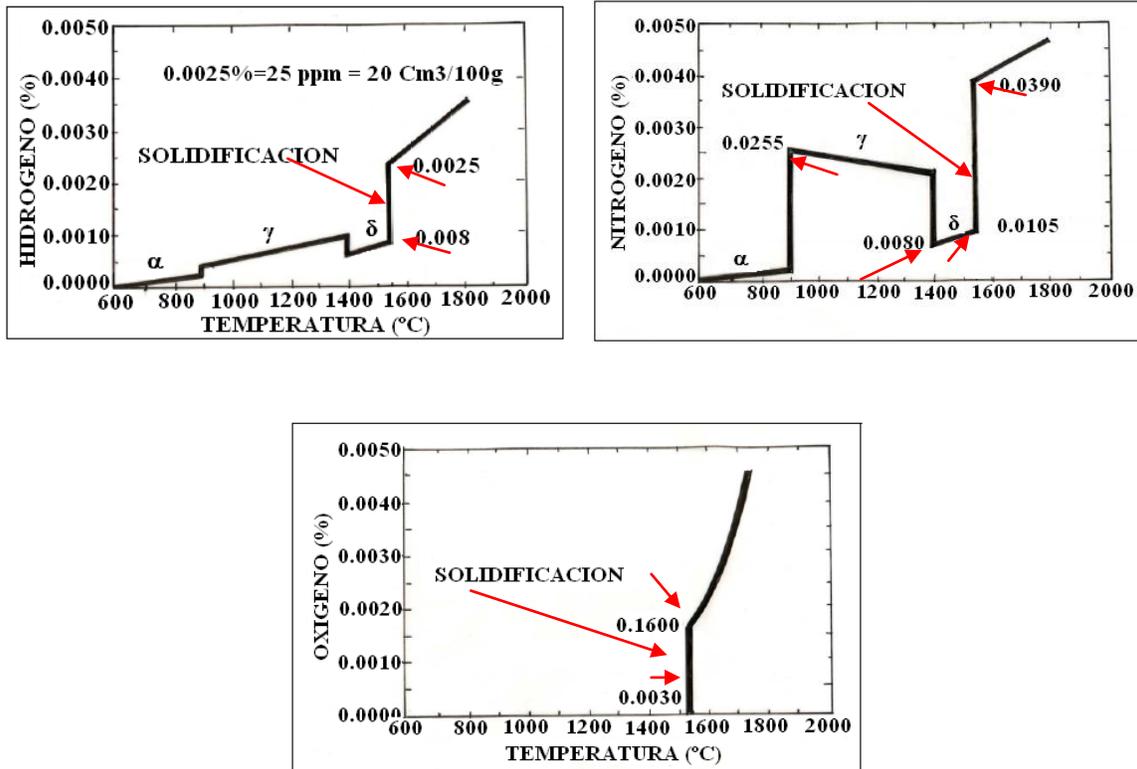


Fig. 5 Por ciento de gas disuelto en acero líquido y sólido.

Por ejemplo, la figura 5 muestra el por ciento de gas H_2 , N_2 y O_2 , en acero líquido como en acero sólido. Como se puede observar en la gráfica que corresponde al hidrogeno, cuando se lleva a cabo la solidificación, se tiene una liberación de gas de $17 \text{ cm}^3/100\text{g}$, el cual nuclea y da origen a la formación de burbujas (porosidad).

CAPITULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 Clasificación, propiedades y aplicaciones de los aceros inoxidables.

Los aceros inoxidables son básicamente aleaciones de hierro, carbono y cromo, con adiciones de otros elementos, en proporciones distintas.

El cromo es el elemento que imparte la resistencia a la corrosión, característica fundamental de estas aleaciones, y para tal efecto, su contenido mínimo es de 10.5 %.

El acero inoxidable puede ser clasificado en cinco familias diferentes; cuatro de ellas corresponden a las particulares estructuras cristalinas formadas en la aleación: austenita, ferrita, martensita y dúplex (austenita mas ferrita); mientras que la quinta son las aleaciones endurecidas por precipitación, que están basadas más en el tipo de tratamiento térmico usado que en la estructura cristalina.

1.1.1 Aceros inoxidables martensíticos

Son la primera rama de los aceros inoxidables simplemente al cromo. Representan una porción de la serie 400, sus características son:

Moderada resistencia a la corrosión

Endurecibles por tratamiento térmico y por lo tanto se pueden desarrollar altos niveles de resistencia mecánica y dureza

Son magnéticos

Debido al alto contenido de carbono y a la naturaleza de su dureza, es de pobre soldabilidad

Los Martensíticos son esencialmente aleaciones de cromo y carbono. El contenido de cromo es generalmente de 10.5 a 18% y el de carbono es alto, alcanzando valores de hasta 1.2%.

1.1.2 Aceros inoxidables ferríticos

Estos aceros inoxidable de la serie 400 AISI (American Iron & Steel Institute) mantienen una estructura ferrítica estable desde la temperatura ambiente hasta el punto de fusión, sus características son:

- Resistencia a la corrosión de moderada a buena, la cual se incrementa con el contenido de cromo y algunas aleaciones de molibdeno
- Endurecidos moderadamente por trabajo en frío: no pueden ser endurecidos por tratamiento térmico
- Son magnéticos
- Su soldabilidad es pobre por lo que generalmente se eliminan las uniones por soldadura a calibres delgados
- Usualmente se les aplica un tratamiento de recocido con lo que obtienen mayor suavidad, ductilidad y resistencia a la corrosión
- Debido a su pobre dureza, el uso se limita generalmente a procesos de formado en frío

Los Ferríticos son esencialmente aleaciones con cromo. El contenido de cromo es usualmente de 10.5 a 30%, pero contenidos limitados de carbono del orden de 0.08%. Algunos grados pueden contener molibdeno, silicio, aluminio, titanio y niobio que promueven diferentes características.

1.1.3 Aceros inoxidables austeníticos

Los aceros inoxidables austeníticos constituyen la familia con el mayor número de aleaciones disponibles, integra las series 200 y 300 AISI. Su popularidad se debe a su excelente formabilidad y superior resistencia a la corrosión. Sus características son las siguientes:

- Excelente resistencia a la corrosión
- Endurecidos por trabajo en frío y no por tratamiento térmico
- Excelente soldabilidad
- Excelente factor de higiene y limpieza

- Formado sencillo y de fácil transformación
- Tienen la habilidad de ser funcionales en temperaturas extremas
- Son no magnéticos

Los Austeníticos se obtienen adicionando elementos formadores de austenita, tales como níquel, manganeso y nitrógeno. El contenido de cromo generalmente varía del 16 al 26% y su contenido de carbono es del rango de 0.03 al 0.08%. El cromo proporciona una resistencia a la oxidación en temperaturas aproximadas de 650° C en una variedad de ambientes.

Esta familia se divide en dos categorías:

Serie 300 AISI.- Aleaciones cromo-níquel

Serie 200 AISI.- Aleaciones cromo-manganeso-nitrógeno

Serie 300 AISI

Es la más extensa, mantiene alto contenido de níquel y hasta 2% de manganeso. También puede contener molibdeno, cobre, silicio, aluminio, titanio y niobio, elementos que son adicionados para conferir ciertas características. En ciertos tipos se usa azufre o selenio para mejorar su habilidad de ser maquinados.

Serie 200 AISI

Contiene menor cantidad de níquel. El contenido de manganeso es de 5 a 20%. La adición de nitrógeno incrementa la resistencia mecánica.

1.1.4 Aceros inoxidables dúplex.

Son aleaciones cromo-níquel-molibdeno, sus características son las siguientes:

- Son magnéticos
- No pueden ser endurecidos por tratamientos térmicos
- Buena soldabilidad

- La estructura dúplex mejora la resistencia a la corrosión de fractura bajo tensión en ambientes con iones de cloruro.
- Los dúplex tienen un contenido de cromo de entre 18 y 26% y de níquel de 4.5 a 6.5%.
- La adición de elementos de nitrógeno, molibdeno, cobre, silicio y tungsteno imparten ciertas características de resistencia a la corrosión.

1.1.5 Aceros inoxidables endurecibles por precipitación

Esta familia ofrece una alternativa a los aceros inoxidables austeníticos cuando se desea asociar elevadas características mecánicas y de maquinabilidad. Son aleaciones hierro-cromo-níquel que se caracterizan por la resistencia mecánica obtenida a partir del endurecimiento por tratamiento térmico de envejecimiento. Los aceros endurecibles por precipitación están patentados y frecuentemente se les designa con las siglas de la empresa productora.

1.2 La familia de los aceros inoxidables austeníticos

La familia de los aceros inoxidables austeníticos, es el tipo más común de aceros inoxidables. Son más fácilmente conocidos como no magnéticos. Son extremadamente conformables y soldables y pueden ser usados de temperaturas criogénicas a temperaturas al rojo vivo de superficies y motores de reacción. Estos contienen entre 16 y 25% de Cromo y pueden contener nitrógeno en solución, ambos elementos contribuyen a su alta resistencia a la corrosión. Si no fuera por el costo del níquel, el cual ayuda a estabilizar su estructura austenítica, deberían ser usados más ampliamente.

Los aceros inoxidables austeníticos tienen muchas ventajas desde el punto de vista metalúrgico. Pueden ser lo suficientemente suaves (por ejemplo con un límite elástico de alrededor de 200 MP), para ser fácilmente conformados por las mismas herramientas que los aceros al carbono, pero también pueden ser

endurecidos mediante trabajo en frío, hasta límites elásticos de más de 2000 MPa. Su estructura austenítica (FCC Cubica Centrada en las caras) es muy dura y dúctil hasta el cero absoluto. Las últimas resistencias a la corrosión pueden resistir al ataque corrosivo normal del medio ambiente diario que la gente experimenta, mientras que los grados más resistentes a la corrosión, pueden incluso resistir agua de mar hirviendo.

Si estas aleaciones tuvieran deficiencias asociadas, podrían ser las siguientes:

- 1.- Son menos resistentes que los grados ferríticos, porque su mayor coeficiente de expansión térmica tiende a causar que la capa protectora de óxido se astille.
- 2.- Pueden experimentar Stress Corrosion Cracking si se utilizan en un medio en el que tengan insuficiente resistencia a la corrosión.
- 3.- Su límite de resistencia a la fatiga es solo alrededor del 30% de la resistencia a la tracción (contra el 50-60% en los aceros inoxidable ferríticos). Esto, combinado con sus altos coeficientes de expansión térmica, los hace especialmente susceptibles a la fatiga térmica.

Los riesgos de estas limitantes pueden ser evitados tomando las precauciones necesarias.

Los aceros inoxidable austeníticos son el grado de aceros más comúnmente utilizados, ya que en muchas situaciones proporcionan altos niveles de confiabilidad con respecto a la resistencia a la corrosión y por sus propiedades mecánicas. Utilizándolos adecuadamente, pueden ahorrar costos significativos en la etapa del diseño del producto. Se trata de una aleación metálica fácil de usar y con un costo de Etapa de vida del producto inferior al de otros materiales.

Las aleaciones austeníticas pueden tener composiciones en cualquier lugar de la sección del Diagrama de Delong marcado como austenita Fig. 6. Este diagrama fue diseñado para mostrar las fases presentes en las aleaciones en la condición de solidificación tal como se encuentra en las soldaduras. Por lo tanto, también se

aplica a piezas de fundición y colada continua. La característica saliente de las aleaciones austeníticas es que, como el cromo y el molibdeno se incrementan para incrementar propiedades específicas, usualmente resistencia a la corrosión, níquel u otros estabilizadores de austenita deben ser agregados si se quiere preservar la estructura austenítica.

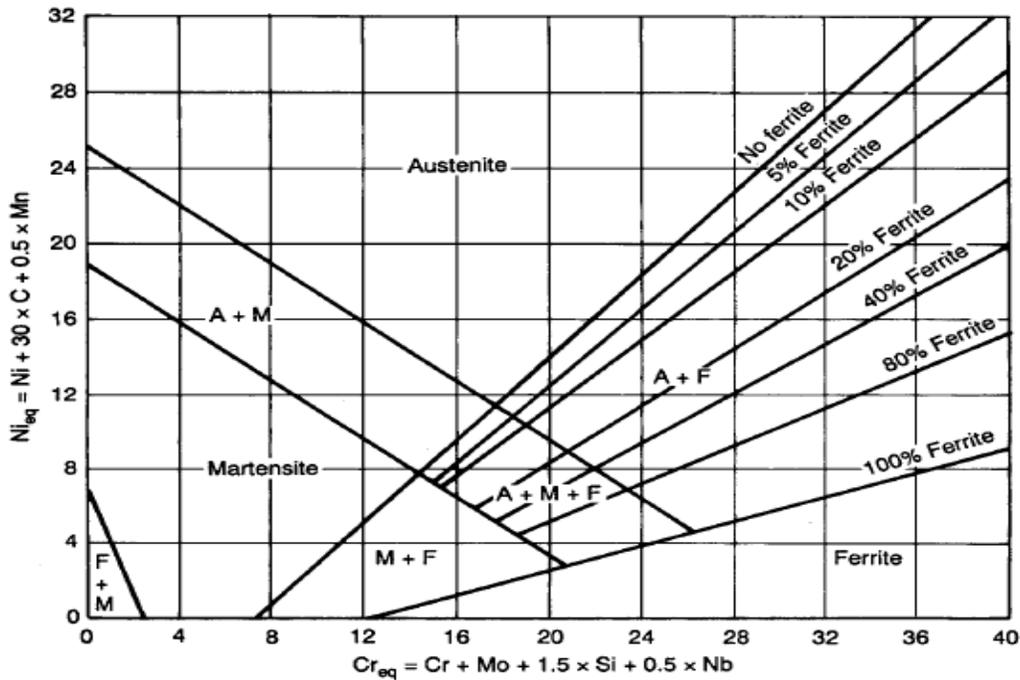


Fig. 6 Construcción del Diagrama Schaeffler-Delong para aceros inoxidable

La forma tradicional de presentar a los aceros inoxidable austeníticos es mostrar al 302 como una base. La figura 7 muestra uno de tales diagramas. Estos diagramas muestran a las familias con un enfoque evolutivo. Muchas aleaciones fueron segregadas debido a avances en el procesamiento de las mismas. Por ejemplo, el 321 fue desarrollado como una aleación en la cual los efectos perjudiciales del carbono, fueron anulados con adición de titanio.

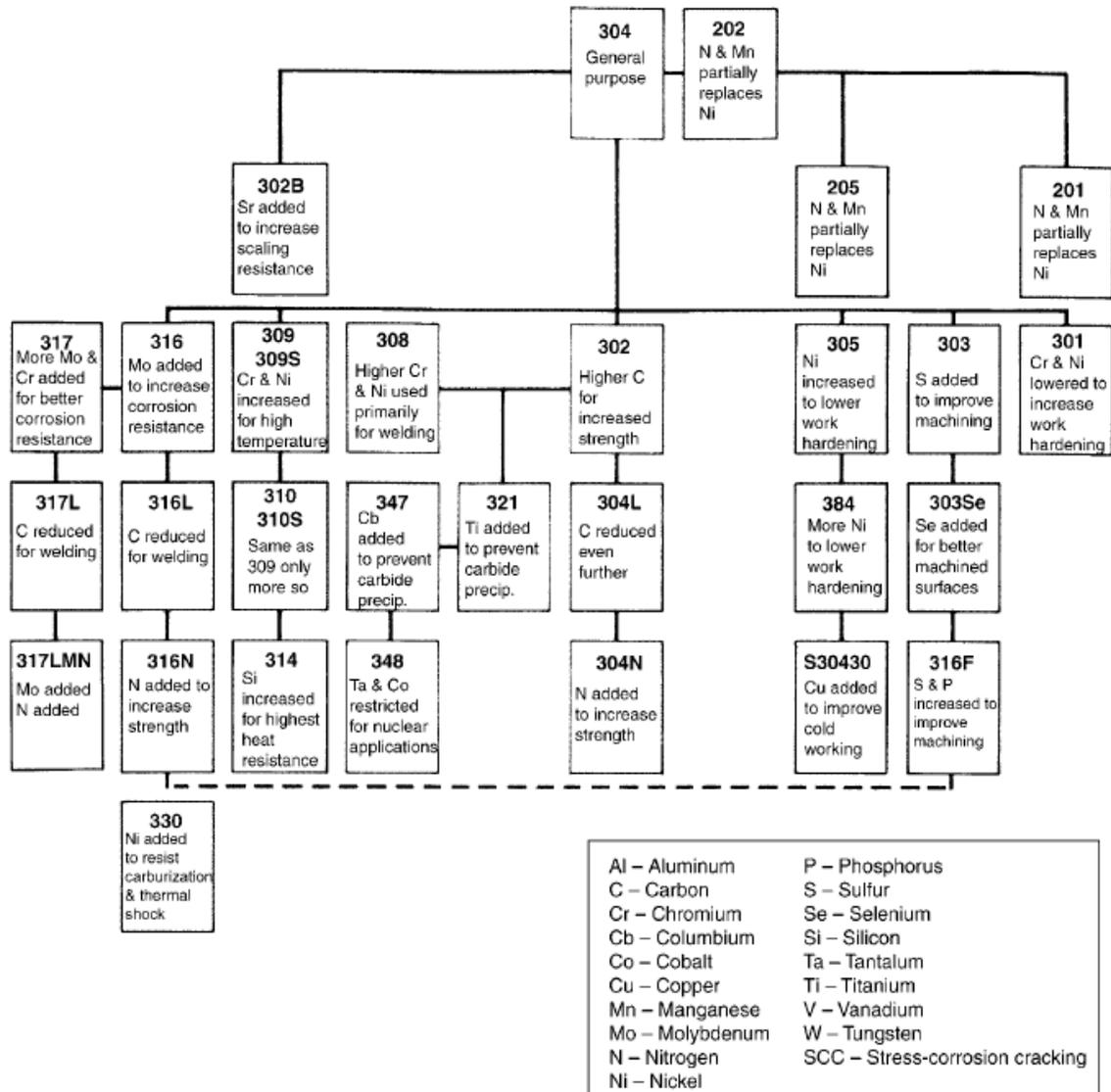


Fig. 7 La familia de aceros inoxidable austeníticos.

Para este estudio, el objeto se centra en los aceros inoxidable, resultado de aleaciones Cromo-Níquel, utilizadas cuando el objetivo es resistencia a la oxidación en altas temperaturas. Estos aceros pueden ser enriquecidos por silicio. Si su aplicación requiere resistencia a altas temperaturas, pueden ser agregados: Carbono, Nitrógeno, Niobio y Molibdeno. El 302B, 309, 310, 347 y otros más se encuentran en este grupo.

1.2.1 Acero inoxidable 347

Información química

Carbono	0.08 máx.
Cromo	17 - 19
Hierro	Bal.
Manganeso	2 máx.
Níquel	9 - 13
Niobio	Min:5 x C
Fósforo	0.045 máx.
Silicio	1 máx.
Azufre	0.03 máx.

Características principales de diseño.

Similar al 321, el acero 347 usa Columbio como elemento estabilizador para maximizar su principal característica: la resistencia a la corrosión intergranular. Puede ser usado en aplicaciones que requieren calentamientos constantes en el rango de 427 a 899 °C.

Aplicaciones

Juntas de alta temperatura y juntas de dilatación, piezas de motores de cohetes, aviones de anillos colectores y colectores de escape y equipos de producción química.

Maquinabilidad

Ligeramente más duro que el acero 304, este material puede producir la misma viruta fibrosa. El uso de velocidades bajas y avances constantes, pueden minimizar la tendencia de esta aleación a endurecerse.

Soldadura

Los aceros inoxidable austeníticos son considerados los que mejor calidad tienen para la soldadura por arco eléctrico y por fusión. Existen dos consideraciones importantes en la generación del cordón de soldadura: 1) la conservación de la resistencia a la corrosión y 2) la prevención de formación de grietas.

Esto es importante para mantener el nivel del elemento estabilizador presente en este acero durante la soldadura. Además, este acero es más resistente a la pérdida de columbio. Durante el proceso de soldadura es muy importante impedir la captación de carbono de aceites y otras fuentes de nitrógeno de aire. Las buenas prácticas de soldadura incluyen extremada limpieza y buena protección de gas inerte y son recomendadas para estos grados estabilizados y para otras aleaciones no estabilizadas.

Trabajo en caliente

Se recomiendan temperaturas de trabajo de 2100-2250 F (1149-1232 °C) para forjar, y otros procesos de trabajo en caliente. El material debe ser agua templada o totalmente recocido después de trabajar para conservar la máxima resistencia a la corrosión.

Trabajo en frío.

Aunque este material requiere esfuerzos iniciales más elevados que inoxidable 304, es muy resistente y dúctil y se puede estampar fácilmente.

Recocido

Debe estar entre un rango de temperaturas de 1850-2000 F (1010-1093 C), enfriamiento en agua. Este procedimiento resultará en la máxima ductilidad.

Endurecimiento

Esta aleación no se endurece por tratamiento térmico. Sus propiedades elevadas sólo pueden ser obtenidas a través de la reducción en frío.

1.3 Especificación del procedimiento de soldadura (WPS)

Una especificación del procedimiento de soldadura (WPS) establece las directrices generales para la práctica de soldadura en campo del fabricante para cada combinación prevista de las variables esenciales. Los parámetros de soldadura y los rangos son especificados y utilizados para preparar las hojas de datos de procedimientos de soldadura asociados.

1.3.1 Procesos de soldadura.

Algunos de los procesos más comunes utilizados se enumeran a continuación con sus correspondientes designaciones de la letra:

- Soldadura por arco metálico (SMAW)
- Soldadura por arco metálico con gas (GMAW)
- Soldadura por arco con fundente (FCAW)
- Soldadura por arco de gas tungsteno (GTAW)
- Soldadura por arco sumergido (SAW)

Modo de los procesos

- Manual,
- Semiautomático
- Automático

1.4 Soldadura por arco eléctrico con electrodo de tungsteno y gas (GTAW)

La soldadura por arco de tungsteno con gas (TIG) es un proceso, en que la fusión es producida por el calor de un arco que se establece entre un electrodo de

tungsteno no-consumible y la pieza de trabajo. La protección se obtiene de un gas inerte (argón o helio).

La Fig. 8 muestra el esquema del proceso TIG. Ahí se indican el arco, el electrodo de tungsteno y la envoltura protectora de gas sobre la pieza de trabajo.

La varilla desnuda de metal de aporte es aplicada manualmente, introduciéndola en el arco y en el baño de fusión, como en el proceso oxi-acetilénico. Se puede o no emplear metal de aporte.



Fig. 8 Proceso de soldadura GTAW

1.4.1 Características del proceso.

Las características sobresalientes de la soldadura TIG son:

- Excelente calidad de la soldadura en casi todos los metales y aleaciones empleados por la industria.
- Prácticamente no se requiere ninguna limpieza posterior.
- Arco y baño de fusión son claramente visibles para el soldador.
- No hay metal de aporte que atraviese el arco, de modo que no se producen salpicaduras.
- La soldadura es posible en todas las posiciones.
- No se produce escoria que podría quedarse atrapada en la soldadura.

El proceso TIG puede emplearse para aluminio, magnesio, acero inoxidable, bronce, plata, cobre, níquel y aleaciones, hierro fundido, aceros dulces, aceros aleados, abarcando una amplia gama de espesores de metal.

1.4.2 Equipo.

Los principales componentes del equipo requerido para el proceso TIG son:

- La máquina de soldar (fuente de poder).
- La pistola y los electrodos de tungsteno.
- Los alambres para metal de relleno.
- El gas protector y controles

Están disponibles varios accesorios opcionales, que incluyen un pedal para control remoto, permitiendo al soldar controlar la corriente durante la soldadura y pudiendo así efectuar correcciones y llenar cráteres. Así mismo están disponibles sistemas de circulación de agua de enfriamiento para la pistola, un distribuidor para encendido del arco, etc.

La máquina para soldar. Para el proceso TIG se emplea una máquina de soldar (fuente de poder) de diseño especial. Puede ser un rectificador con CA/CC o un generador de corriente continua (CC) con una unidad de alta frecuencia.

La selección de corriente CA o CC depende del material a soldar. Corriente alterna es recomendada para la soldadura de aluminio y magnesio; corriente continua se recomienda para soldadura de aceros inoxidables, hierro fundido, acero Al C y baja aleación, cobre, níquel y aleaciones y plata. Una típica máquina de soldar TIG opera con un amperaje de 3 a 350 amperios, con 10-35 voltios y un Etapa de servicio de 60%.

También es posible hacer uso de fuentes de poder normales de CA o CC, diseñadas principalmente par electrodos revestidos, adicionando un dispositivo

para alta frecuencia. Sin embargo, los mejores resultados se obtienen con una máquina de soldar especialmente diseñada para la soldadora TIG.

La pistola TIG sujeta el electrodo de tungsteno y dirige el gas protector y la energía de soldar al arco. Las pistolas pueden ser enfriadas por agua o aire, lo que depende del amperaje de la corriente para soldar. Generalmente se emplean las pistolas con enfriamiento para agua.

1.4.3 El gas de protección.

Un gas inerte, sea argón, helio o una mezcla de ambos, protege el arco de los gases perjudiciales de la atmósfera. El argón es más usado, porque es fácil obtenerlo y, siendo más pesado que el helio, proporciona mejor protección a menor grado de presión. Para la soldadura en posición plana y vertical es suficiente un caudal de 15 a 30 pies cúbicos/hora. La posición sobre cabeza requiere un caudal ligeramente mayor.

1.4.4 Los electrodos.

Los electrodos que se emplean para el proceso TIG son de tungsteno y aleaciones de tungsteno. Tienen un punto de fusión muy elevado (6 170°F) y prácticamente no se consumen. El electrodo no toca el baño fundido. En posición apropiada, el electrodo es sostenido encima de la pieza de trabajo, y es el calor intenso procedente del arco el que mantiene el baño en estado líquido. Los electrodos son de tungsteno puro (los más baratos), tungsteno con 1- 2% de torio (de larga vida - se emplean para aceros) o de tungsteno aleado con circonio (menor contaminación, mejor calidad- se emplean para aluminio). Los diferentes tipos de tungsteno son fácilmente reconocibles según un código de color. Se presentan en varios diámetros y largos de 3 a 24 pulgadas.

1.4.5 El metal de aportación.

Se puede o no emplear metal de aporte. Normalmente es empleado, con excepción de casos en que se suelda láminas delgadas. La composición del metal

de aporte deber ser adecuada para el metal base. Los diámetros de las varillas de metal de aporte dependen del espesor del metal base y de la corriente para soldar. La alimentación del metal de aporte puede ser manual o automática.

1.5 Soldadura por arco eléctrico con alambre sólido y gas (SMAW).

En la soldadura por Arco Metálico con Gas, conocida como Proceso MIG/MAG, la fusión es producida por un arco que se establece entre el extremo del alambre aportado continuamente y la pieza a soldar. La protección se obtiene íntegramente de los gases suministrados simultáneamente con el metal de aporte.

Existen dos clasificaciones en este proceso, las cuales son en función del tipo de gas protector:

- MIG: El cual emplea protección de un gas inerte puro, (helio, argón, etc.). Para metal no ferroso.
- MAG: El cual hace uso de dióxido de carbono, o mezcla de +Argón como gas protector. Para metal ferroso.

La tarea, que cumplen los gases protectores arriba mencionados, es la de proteger al arco, al baño de fusión y al material de aporte contra el peligroso acceso de los gases de la atmósfera.

Este proceso de soldadura se muestra en al Fig. 9, en ella se señala el alambre, la protección gaseosa, el arco y el metal depositado. El proceso puede ser semiautomático o automático, siendo el método semiautomático el de mayor aplicación.

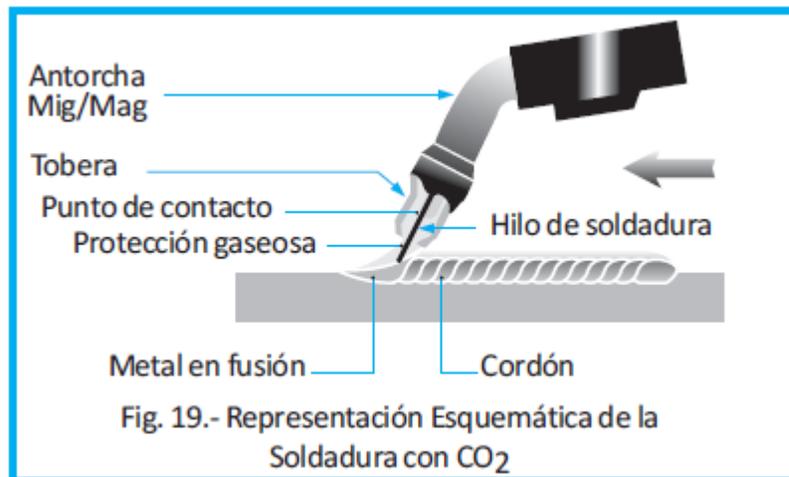


Fig.9 Proceso de soldadura MAG.

El tipo de transferencia del alambre de aporte a través del arco depende del valor de la corriente. A bajas corrientes, la transferencia se realiza por grandes glóbulos o gotas (cortocircuito, globular). Cuando la corriente aumenta y se usa 80% de Argón, estas gotas se reducen progresivamente hasta que, a una determinada corriente que depende del material y del diámetro del alambre, la transferencia se efectúa en finas gotitas o por pulverización (Spray).

1.5.1 Características del proceso.

Este proceso permite:

- Excelente calidad de soldadura en casi todos los metales y aleaciones empleados por la industria.
- Mínima limpieza después de soldar.
- Arco y baño fundido claramente visibles para el soldador.
- Fácil trabajo en todas las posiciones, lo que depende del diámetro del alambre y de las variables del proceso.
- Alta velocidad de trabajo.
- Exento de escoria.

- Cuando se hace uso de CO₂, es para soldar aceros al carbono y aceros de baja aleación, empleando el alambre adecuado.
- Cuando se hace uso de argón o helio (MIG), es para soldar sólo material no ferroso, aluminio-cobre-magnesio, etc.

La razón del uso de Argón o Helio como gas protector en estos materiales se debe al carácter oxidante del CO₂.

1.5.2 Equipo.

Los componentes principales del equipo requerido para el proceso se muestran en la Fig. 20 y son:

- La máquina de soldar (fuente de poder).
- Motor para la alimentación de alambre y controles.
- La antorcha o pistola o ensamblaje de cables para soldadura semiautomática refrigerada por aire o por agua.
- Suministro de gas protector y controles.
- Alambres o material de aporte.

La máquina de soldar. La fuente de poder es del tipo de “voltaje constante” (CV). Las fuentes de poder de voltaje constante no tienen control de amperaje y, por ello, no pueden ser empleadas para la soldadura Manual con electrodos.

Normalmente se emplea, para este proceso, corriente continua con polaridad invertida. Las máquinas están disponibles desde 100 a 500 amperios.

El alimentador de alambre. Es el dispositivo que hace que el alambre pase por el tubo de contacto de la pistola para fundirse en el arco.

El alimentador tiene uno o dos pares de rodillos accionados por un motoreductor de velocidad variable.

Tienen 1 electroválvula para controlar el paso de gas de protección. Consta de:

- Porta Rollo
- Guía de Alambre

-Rodillo de Arrastre

Los sistemas de alimentación pueden ser:

-De empuje (Push)

-De arrastre (Pull)

-Combinado (Push - Pull)

La antorcha o pistola es el conjunto de cables que sirven para conducir el alambre, la corriente para soldar y el gas protector está dispuesto en forma concéntrica a la guía.

La guía de alambre se encuentra en el centro de la boquilla, y el canal de suministro de gas protector está dispuesto en forma concéntrica a la guía.

La pistola debe mantenerse bastante cerca del trabajo para controlar el arco apropiadamente y producir una eficiente protección a través del gas protector.

Las pistolas pueden ser de diferente diseño: del tipo mango de pistola o con cabezal curvo (cuello de ganso). El tipo cuello de ganso es muy popular para la soldadura con alambres finos, en todas las posiciones; y el tipo mango de pistola se emplea generalmente con alambres más gruesos, en posición plana.

Para la soldadura plenamente automática, se suele montar la pistola directamente en el motor de avance del alambre. Las pistolas automáticas tienen enfriamiento por aire o agua, lo que depende de su aplicación. En la soldadura CO₂, con frecuencia se emplea un sistema de suministro lateral de gas para las pistolas automáticas.

El gas protector, desplaza el aire alrededor del arco para evitar la contaminación del metal fundido con gases de la atmósfera. La envoltura protectora de gas debe proteger eficientemente el área del arco para obtener un metal de aporte de buena calidad.

El gas protector, para la soldadura por arco metálico a gas normalmente usado, es el argón, helio o una mezcla para metales no-ferrosos; para aceros se emplea

CO₂, CO₂ con argón y a veces helio para aceros inoxidable o argón con pequeña cantidad de oxígeno para ciertos aceros y aceros inoxidable.

Los gases protectores deben tener la especificación “Welding Grade” (“grado para soldadura”). De esta manera se consigue un nivel específico de pureza y de contenido de humedad.

Los grados de la presión de gas dependen del tipo de gas empleado, del metal a soldar, de la posición de soldar, velocidad de avance y de las corrientes de aire.

Alambre de aporte. La composición del alambre para soldadura por arco metálico a gas debe seleccionarse de acuerdo al metal a soldar, a la variación dentro del proceso MIG/MAG y la atmósfera de protección.

Los alambres están disponibles en diferentes diámetros, en carretes. Por lo general, están empaquetados en recipientes especiales para protegerlos del deterioro durante el almacenaje.



Fig. 10 Tobera con gas protector MIG/MAG

1.6 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Espectrometría de masas

La Espectrometría de Masas es una técnica microanalítica usada para determinar la masa molecular de una sustancia de interés, así como proporcionar información estructural y la composición isotópica de las mismas. Para ello, es necesario ionizar la molécula mediante diferentes técnicas, algunas de ellas producen iones con gran exceso de energía, y se denominan técnicas duras, dando lugar a una fragmentación extensiva de la muestra, tal es el caso de la Ionización Electrónica (EI). Otras técnicas, producen esencialmente el ion molecular y se denominan técnicas de ionización blandas, tales como la Ionización Química (CI), Ionización Química a Presión Atmosférica (APCI) e Ionización por Electro Spray (ESI).

Los iones formados son acelerados y enfocados hacia el analizador, que los separa en función de su relación masa/carga (m/z) y estos, son detectados como corrientes iónicas cuyas intensidades son proporcionales a sus abundancias respectivas. Estas intensidades son digitalizadas y enviadas a un sistema informático que permite estudiar las señales recibidas, manipularlas y compararlas con librerías comerciales de espectros ya registrados.

Las aplicaciones de la espectrometría de masas son múltiples, tanto en la síntesis orgánica y organometálica, productos naturales, en la farmacocinética, contaminación ambiental entre otros.

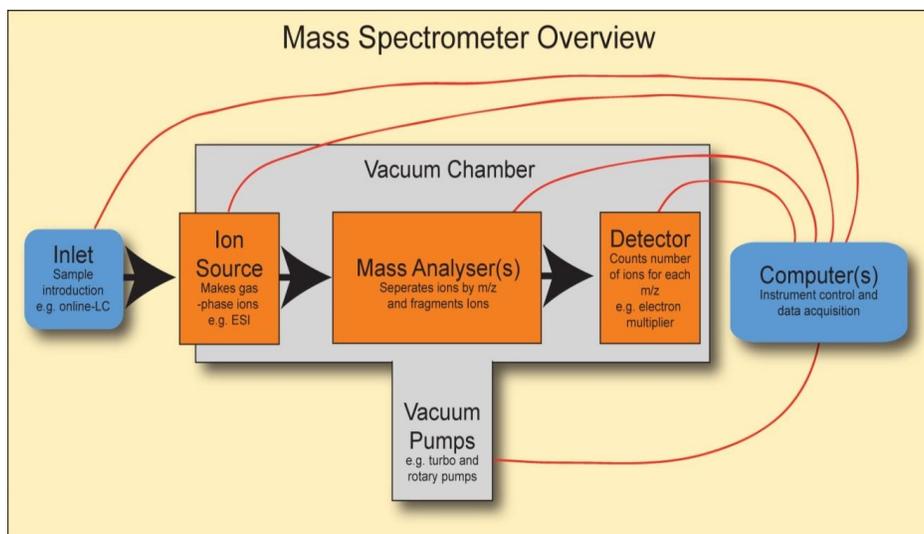


Fig. 11 Visión general del funcionamiento de un espectrómetro de masas.

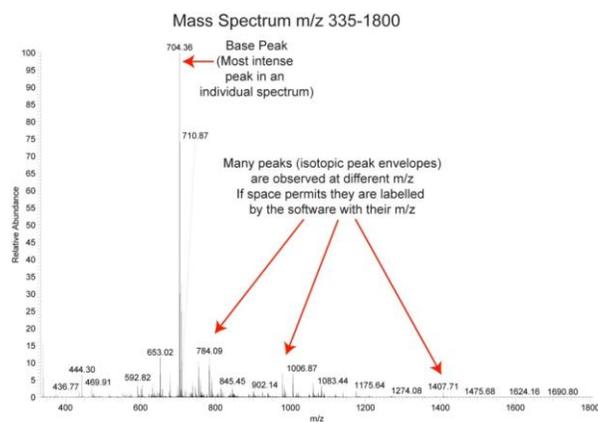


Fig. 12 Obtención gráfica de resultados de la espectrometría.

1.6.1 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La técnica esencialmente consiste en hacer incidir en la muestra un haz de electrones. Este bombardeo de electrones provoca la aparición de diferentes señales que, captadas con detectores adecuados, nos proporcionan información acerca de la naturaleza de la muestra.

La señal de electrones secundarios proporciona una imagen de la morfología superficial de la muestra. La señal de retrodispersados una imagen cualitativa de zonas con distinto número atómico medio, y la señal de rayos X espectros e imágenes acerca de la composición de elementos químicos en la muestra.

Es la mejor técnica aplicada al estudio de la morfología de las superficies. A diferencia de un microscopio óptico que utiliza fotones del espectro visible, la imagen entregada por el SEM se genera por la interacción de un haz de electrones que "barre" un área determinada sobre la superficie de la muestra.

Microscopio electrónico de barrido (MEB)

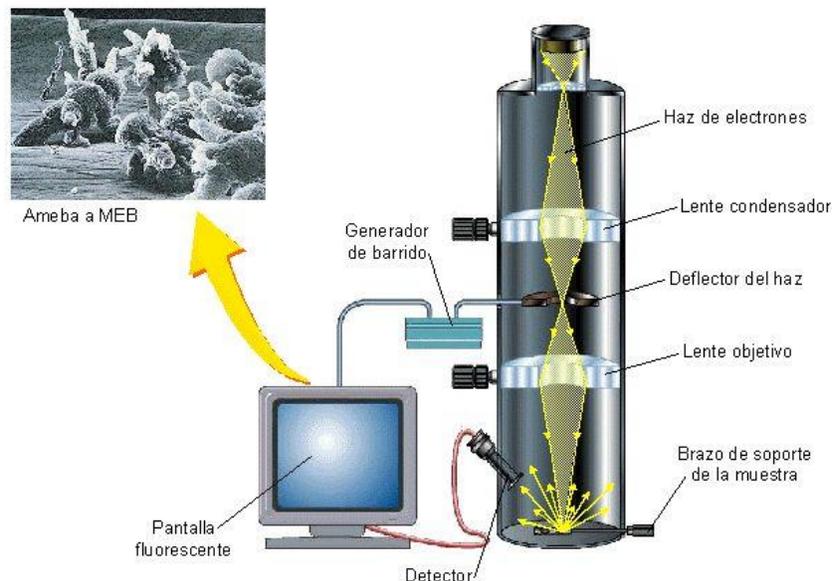


Fig. 13 Microscopio Electrónico de Barrido

CAPÍTULO II. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El siguiente procedimiento experimental se propone para evaluar en comportamiento microestructural y mecánico del cordón de soldadura, con el fin de identificar la causa-raíz de la generación de grietas en zonas críticas del

Regenerador R-101 de la Planta Catalítica de la Refinería Miguel Hidalgo, de Tula Hidalgo.

2.1. Análisis químico del acero por espectrometría de masas.

El análisis químico del acero inoxidable 347, se llevara a cabo en un espectrómetro de masas, para lo cual se cortaran muestras de 1” cuadrada, para someterlo al análisis químico.

Tabla 1. Composición química esperada (en % en peso).

C	Mn	P	S	Cr
0.08Max	1.80 a 2.0	0.030 a 0.045	0.010 a.030	17.0-19.0
Ni	Nb+Ta			
9.0-13.0	10xC a 1.0 máx.			

2.2. Soldadura del acero inoxidable 347

Una de las probetas deberá de soldarse de acuerdo con la especificación del procedimiento de soldadura WPS-02, mediante un procedimiento de soldadura GTAW-SMAW de tipo manual. El tipo de acero a soldar es el SA-312 TP 347. El material de aporte se identifica con un número de especificación SFA 5.4 clase E-347-16 para un rango de espesor/ranura de 3/16” a 8”_{MAX}. La posición de la ranura del acero inoxidable fue 6G all fillet y se utilizó un gas argón de 99.99% de pureza como escudo protector.

Las probetas restantes deberán de soldarse de acuerdo con la especificación del procedimiento de soldadura Condisa-WPS03, mediante un procedimiento de

soldadura GTAW de tipo manual. El tipo de acero a soldar es el SA-312 TP 347. El material de aporte se identifica con un número de especificación SFA 5.9 clase E-347 para un rango de espesor/ranura de 3/16” a 8”_{MAX}. La posición de la ranura del acero inoxidable fue *6G all fillet* y se utilizó un gas argón de 99.99% de pureza como escudo protector.

2.3. Corte de muestras

El corte en la parte central del cordón de soldadura (corte longitudinal y transversal) se llevara a cabo mediante electroerosión, lo cual evita la generación de esfuerzos. Este mismo procedimiento de corte, se utilizara para el corte de muestras para difracción de rayos-x y probetas de tensión.

2.4. Tratamientos térmicos del acero inoxidable 347.

2.4.1 Etapa de Relevado de Esfuerzos-THERMICA MEXICANA (P-J3).

Etapa de calentamiento.

De temperatura ambiente a 600 °F (315°C) se calienta sin restricción, procediéndose a controlar la temperatura de 600 °F (315°C) hasta 1650 °F (898.8°C), a una velocidad máxima de calentamiento de 216 °F/ hora (102°C/hora).

Este Etapa tendrá una duración de 5 horas con 52 minutos aproximadamente (de temperatura ambiente a 1650 °F (898.8°C)).

Etapa de mantenimiento de temperatura.

La temperatura durante este período debe ser de 1650 °F (898.8°C) y se mantendrá por 120 minutos.

Este Etapa debe tener una duración dependiendo el espesor y comienza cuando todos los termopares hayan alcanzado la temperatura de 1650 °F (898.8°C).

Etapa de enfriamiento

Desde 1650 °F (898.8°C) hasta 600 °F (315°C), la velocidad de enfriamiento será de 216 °F/hora (102°C/hora).

Esta Etapa tendrá una duración aproximada de 4 horas con 52 minutos.

Enfriamiento de 600 °F (315°C) hasta ambiente, luego que la temperatura haya disminuido a 600 °F (315°C) las máquinas serán apagadas, se desconectan los cables y se dejará enfriar hasta temperatura ambiente con el aislamiento térmico colocado.

2.4.2 Etapa de Annealing por THERMICA MEXICANA (P-J4).

Etapa de calentamiento.

De temperatura ambiente a 600 °F (315°C) se calienta sin restricción, procediéndose a controlar la temperatura de 600 °F (315°C) hasta 1950 °F (1065.5°C), a una velocidad máxima de calentamiento de 216 °F/ hora (102°C/hora).

Esta Etapa tendrá una duración de 7 horas con 15 minutos aproximadamente (de temperatura ambiente a 1950 °F (1065.5°C)).

Etapa de mantenimiento de temperatura.

La temperatura durante este período debe ser de 1950 °F (1065.5°C) y se mantendrá por 60 minutos.

Esta Etapa debe tener una duración dependiendo del espesor y comienza cuando todos los termopares hayan alcanzado la temperatura de 1950 °F (1065.5°C).

Etapa de enfriamiento

Desde 1950 °F (1065.5°C) hasta temperatura ambiente, será al aire removiendo el aislamiento térmico y graficando la caída.

2.4.3 Relevado de Esfuerzos (P-J5)

Etapa de calentamiento

De temperatura ambiente a 600 °F (315°C) se calienta sin restricción, procediéndose a controlar la temperatura de 600 °F (315°C) hasta 1112 °F (600°C), a una velocidad máxima de calentamiento de 216 °F/ hora (102°C/hora).

Duración de 3 horas con 22 minutos aproximadamente (de temperatura ambiente a 1112 °F (600°C)).

Etapa de mantenimiento de temperatura.

La temperatura durante este período debe ser de 1112 °F (600°C) y se mantendrá por 120 minutos. Este Etapa debe tener una duración dependiendo el espesor y comienza cuando todos los termopares hayan alcanzado la temperatura de 1112 °F (600°C).

Etapa de enfriamiento

Desde 1112 °F (600°C) hasta 600 °F (315 °C), la velocidad de enfriamiento será de 216 °F/hora (102°C/hora).

Período de enfriamiento hasta 600 °F (315°C), este Etapa tendrá una duración aproximada 2 horas con 22 minutos. Enfriamiento de 600 °F (315°C) hasta ambiente, luego que la temperatura haya disminuido a 600 °F (315°C) las máquinas serán apagadas, se desconectan los cables y se dejará enfriar hasta temperatura ambiente con el aislamiento térmico colocado.

2.4.4 Relevado de esfuerzos-Solubilidad de carburos-Estabilidad de fase (P-J6).

Etapa de calentamiento

De temperatura ambiente a 600 °F (315°C) se calienta sin restricción, procediéndose a controlar la temperatura de 600 °F (315°C) hasta 1112 °F (600°C), a una velocidad máxima de calentamiento de 216 °F/ hora (102°C/hora).

Duración de 3 horas con 22 minutos aproximadamente (de temperatura ambiente a 1112 °F) (600°C).

Etapas de mantenimiento de temperatura.

La temperatura durante este período debe ser de 1112 °F (600°C) y se mantendrá por 120 minutos. Esta Etapa tendrá una duración dependiendo el espesor y comienza cuando todos los termopares hayan alcanzado la temperatura de 1112 °F (600°C).

Etapas de recalentamiento

Desde 1112 °F (600°C) hasta 2102 °F (1150°C), la velocidad de calentamiento será de 216 °F por hora (102°C/hora).

Esta Etapa tendrá una duración de 4 horas con 35 minutos aproximadamente.

Etapas de mantenimiento de temperatura.

La temperatura durante este período debe ser de 2102 °F (1150°C) y se mantendrá por 120 minutos.

Esta Etapa debe tener una duración dependiendo el espesor y comienza cuando todos los termopares hayan alcanzado la temperatura de 2102 °F (1150°C).

Etapas de enfriamiento.

Desde 2102 °F (1150°C) hasta 1742 °F (950°C), la velocidad de enfriamiento será de 216 °F por hora.

Etapas de mantenimiento de temperatura.

La temperatura durante este período debe ser de 1742 °F (950°C) y se mantendrá por 60 minutos (102°C/hora).

Esta Etapa debe tener una duración dependiendo el espesor y comienza cuando todos los termopares hayan alcanzado la temperatura de 1742 °F (950°C).

Etapa de enfriamiento.

Desde 1742 °F (950°C) hasta temperatura ambiente, será al aire removiendo el aislamiento térmico y graficando la caída.

2.5 Evaluación microestructural, mecánica y de acumulación de esfuerzos.

2.5.1 La evaluación de la microestructura en el cordón de soldadura, zona afectada por el calor y material base, se analizará:

Microscopía electrónica de barrido, utilizando un microscopio Jeol de última generación operado a 20 Kv y 3 amp., acoplado a sistemas de microanálisis el cual utiliza una distancia de trabajo de 27 cm y tiempo de microanálisis de 200 segundos de tiempo de máquina por análisis.

En cada región se identificarán:

- a) Fases presentes, dando énfasis a la presencia de austenítica (γ), ferrita-delta (δ) y fase sigma (σ).
- b) Se determinará el tamaño de grano y se cuantificará analíticamente si se tiene o no presencia de segregación o ferrita delta y fase sigma.
- c) Precipitados primarios de cromo en límite de grano y matriz.
- d) El papel de los elementos estabilizadores niobio (Nb) y tántalo (Ta), en forma de precipitados de carbonitruros (para el primero).
- e) Identificación de inclusiones no-metálicas y escoria (W).

2.5.2 Difracción de rayos-x, utilizando un difractómetro Siemens 500, el cual emplea una radiación de cobre ($\lambda_{Cu}=1.1416 \text{ \AA}$), un ángulo de barrido 2θ de 6° a 120° y una velocidad de barrido de $1^\circ/\text{min}$.

La interpretación de la curva obtenida se hará mediante la ecuación de Bragg:

$\Lambda=2 d \sin \theta$, donde λ es la longitud de onda de la fuente de radiación, d es el espaciamiento interplanar de la fase o compuesto a identificar y θ es el ángulo de barrido.

En cada región: 1) Soldadura 2) Zona Afectada por el Calor y 3) Material Base, se identificara:

- a) Fracción en volumen de fases gama
- b) Fracción en volumen de fase delta
- c) Fracción en volumen de fase sigma.

2.5.3 Pruebas mecánicas de tensión, utilizando una maquina Instron 1200, de 10 toneladas. Durante la prueba se utilizara una velocidad de deformación de 0.5 cm/min. En donde se determinara el 0.2% de límite de fluencia, la última resistencia a la tensión y el por ciento de elongación. Las probetas de tensión se maquinaran de acuerdo a la norma ASTM E8.

- a) Prueba mecánica de tensión a temperatura ambiente.
- b) Prueba mecánica de tensión a 500°C.

CAPÍTULO III. EVALUACIÓN DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS

3.1 Análisis químico de probetas bajo estudio.

La Tabla 2 muestra los resultados de los análisis químicos llevados a cabo en muestras de las probetas identificadas como P-J1, P-J2, P-J3, P-J4, P-J5 y P-J6, mediante la técnica de espectroscopia de masas.

Tabla 2 Composición química de probetas (en % en peso).

Probeta→	P-J1	P-J2	P-J3	P-J4	P-J5	P-J6
Elemento↓						

C	0.075	0.078	0.078	0.077	0.078	0.078
Mn	1.99	2.00	1.99	1.99	2.00	1.99
P	0.035	0.037	0.037	0.038	0.037	0.038
S	0.022	0.028	0.021	0.020	0.027	0.023
Cr	18.89	18.91	18.88	18.99	18.79	18.92
Ni	12.24	12.36	12.72	12.38	12.47	12.55
Nb+Ta	0.82	0.89	0.91	0.91	0.89	0.89
Ti	0.012	0.012	0.012	0.011	0.011	0.011
N	50	49	49	50	50	49
Fe	Bal.	Bal.	Bal.	Bal.	Bal.	Bal.

3.2 Soldadura de probetas de dimensiones 30X15X5 cm

La probeta P-J1 fue soldada de acuerdo con la especificación del procedimiento de soldadura WPS-02, mediante un procedimiento de soldadura GTAW-SMAW de tipo manual.

El tipo de acero a soldar es el SA-312 TP 347.

El material de aporte se identifica con un número de especificación SFA 5.4 clase E-347-16 para un rango de espesor/ranura de 3/16” a 8”_{MAX}.

La posición de la ranura del acero inoxidable fue 6G all fillet y se utilizó un gas argón de 99.99% de pureza como escudo protector.

La probeta P-J2, P-J3, P-J4, P-J5 y p-J6 fueron soldadas de acuerdo con la especificación del procedimiento de soldadura Condisa-WPS03, mediante un procedimiento de soldadura GTAW de tipo manual.

El tipo de acero a soldar es el SA-312 TP 347.

El material de aporte se identifica con un número de especificación SFA 5.9 clase E-347 para un rango de espesor/ranura de 3/16” a 8”_{MAX}.



P-J1



P-J2



P-J3



P-J4



P-J5



P-J6

Fig. 14. Probetas después del proceso de soldadura WPS-02 para la probeta P-J1 y Condisa-WPS-03 para las probetas P-J2, P-J3, P-J4, P-J5 y P-J6.

La posición de la ranura del acero inoxidable fue 6G all fillet y se utilizó un gas argón de 99.99% de pureza como escudo protector.

La figura 14 muestra las probetas bajo estudio después de haber realizado los procedimientos de soldadura del tipo WPS-02 para la probeta P-J1 y Condisa-WPS-03 para las probetas P-J2, P-J3, P-J4, P-J5 y P-J6.

3.3 Corte de probetas de dimensiones 30X15X5 cm

Una vez que las probetas bajo estudio fueron soldadas mediante los procedimientos anteriormente descritos, se procedió a su corte.



Fig. 15. Corte de probeta para análisis de acumulación de esfuerzos y caracterización de estructura y propiedades.

“Estudio para evaluar y calificar el procedimiento de soldadura del acero SA-312 TP 347”

Una mitad de la probeta se destina a la medición del análisis de acumulación de esfuerzos en la condición de soldadura (Probetas P-J1 y P-J2), las probetas P-J3, P-J4, P-J5 y P-J5 se someterán a los tratamientos térmicos descritos más adelante y posteriormente se someterán al análisis de estructura y propiedades mecánicas y de tensión a temperatura ambiente y alta temperatura.

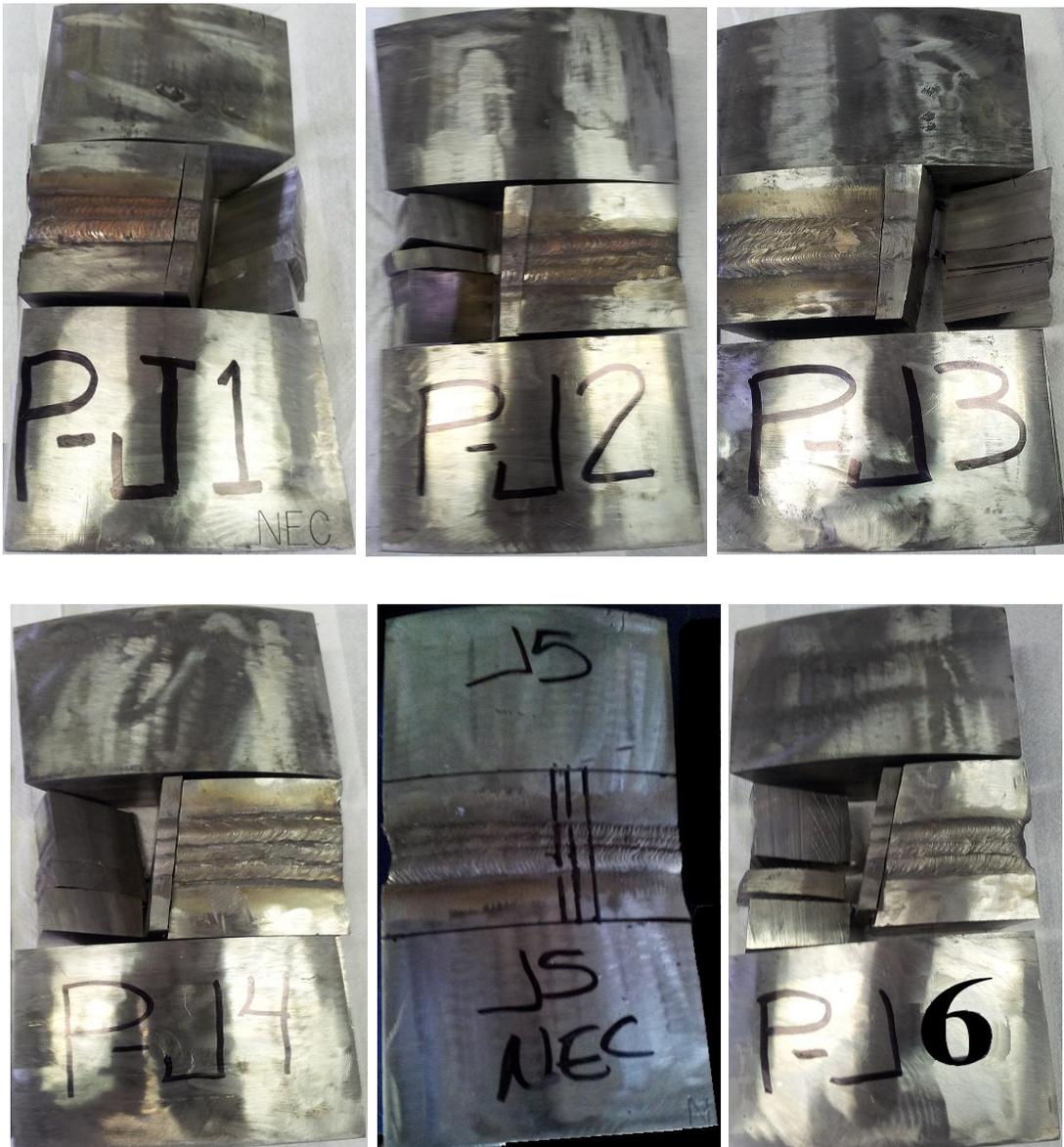


Fig. 16 Corte de muestras para su caracterización microestructural y mecánica.

La figura 16 muestra el corte de muestras para su caracterización microestructural y de propiedades mecánicas de tensión a temperatura ambiente y alta temperatura.

3.4. Tratamientos térmicos a probetas P-J3, P-J4, P-J5 y P-J6.

3.4.1 Tratamiento térmico de relevado de esfuerzos Thermica Mexicana (P-J3).

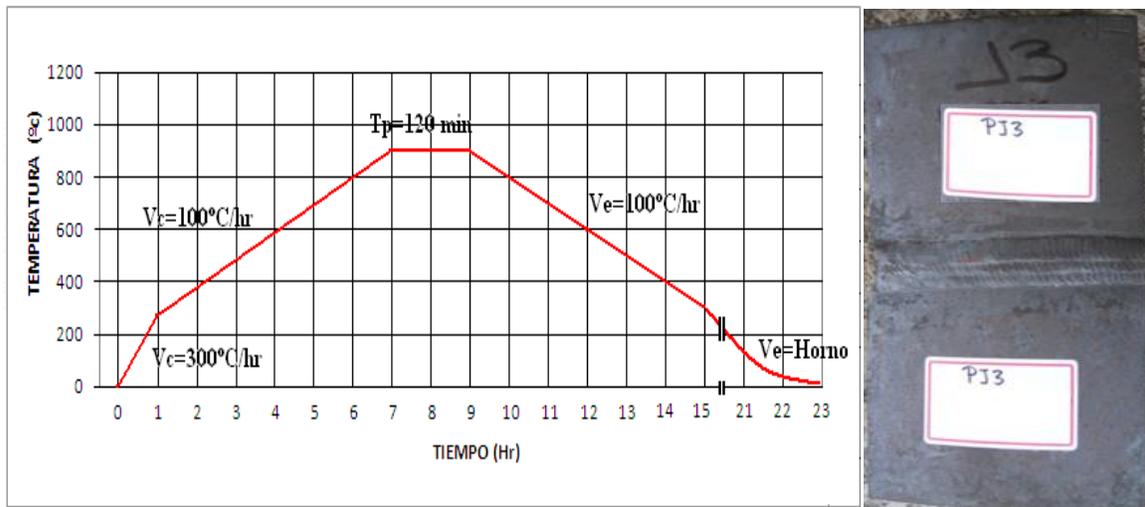


Fig. 17 Etapa de velocidad de calentamiento (V_c), tiempo de permanencia (T_p) y velocidad de enfriamiento (V_e) para el tratamiento térmico de relevado de esfuerzos.

3.4.2 Tratamiento térmico de annealing Thermica Mexicana (P-J4).

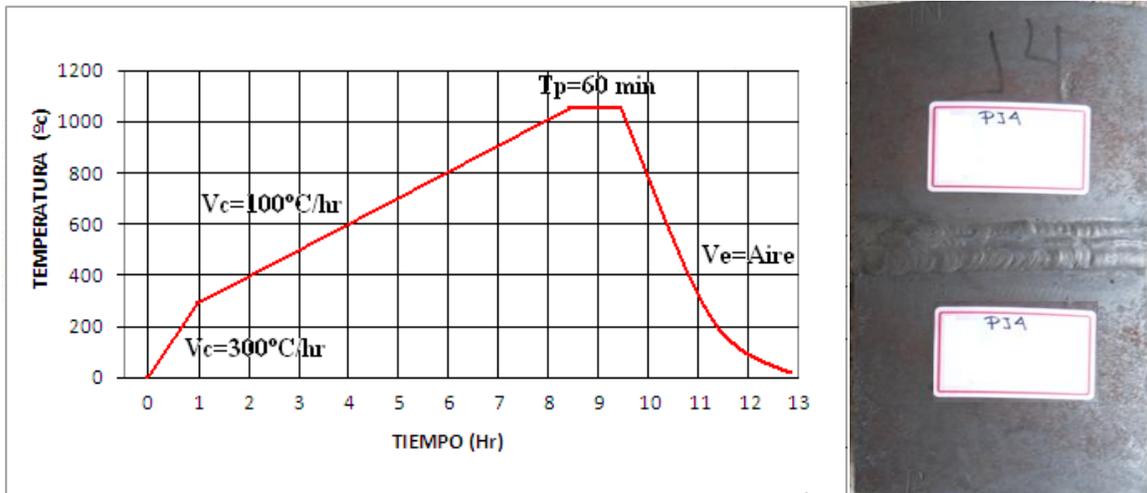


Fig. 18 Etapa de velocidad de calentamiento (V_c), tiempo de permanencia (T_p) y velocidad de enfriamiento (V_e) para el tratamiento tèrmico de annealing .

3.4.3 Tratamiento tèrmico de relevado de esfuerzos UNAM (P-J5).

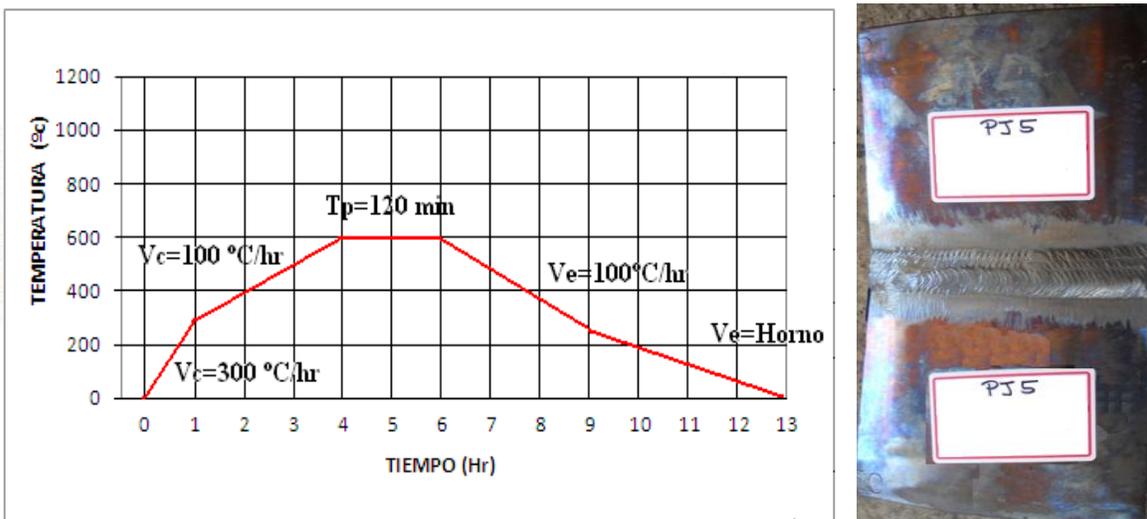
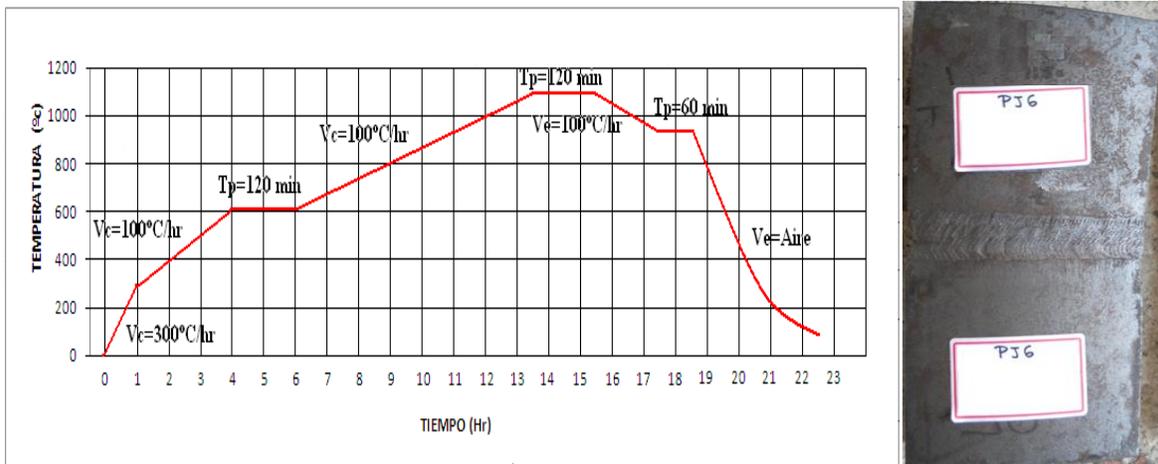


Fig. 19 Etapa de velocidad de calentamiento (V_c), tiempo de permanencia (T_p) y velocidad de enfriamiento (V_e) para el tratamiento tèrmico de relevado de esfuerzos.

3.4.4 Tratamiento tèrmico de relevado de esfuerzos, solubilidad de precipitados y estabilidad de fase UNAM (P-J6).



CAPÍTULO IV. EVALUACIÓN MICROESTRUCTURAL Y MECÁNICA

4.1 Evaluación microestructural

Probeta P-J1 en la condición de soldadura-Cordón de Soldadura.

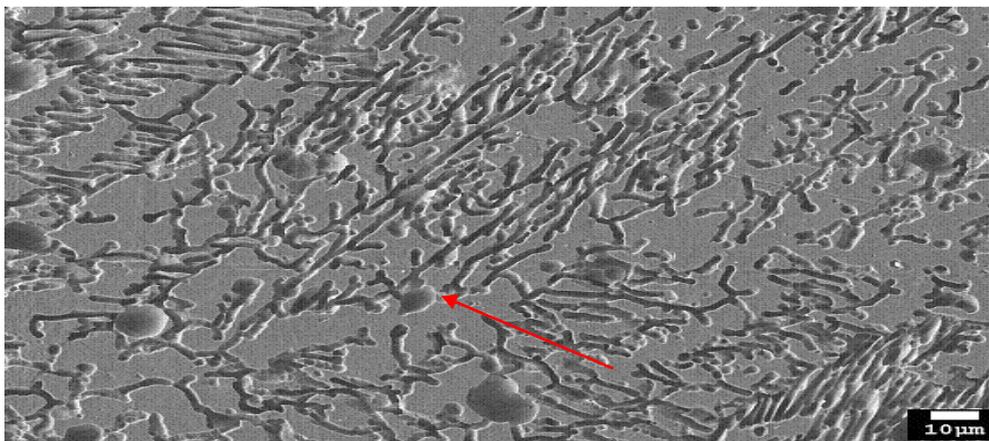


Fig.21 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J1 en el cordón de soldadura.

La figura 21 muestra la microestructura observada en la muestra P-J1 en el cordón de soldadura, en donde se observa la presencia de una matriz de color claro que corresponde a la fase austenítica. Como se puede observar, todas las regiones

interdendríticas muestran la posición de fases primarias continuas. El tamaño promedio de estos brazos dendríticos es de 160 μm .

Probeta P-J1 en la condición de soldadura-Zona Afectada por el Calor.

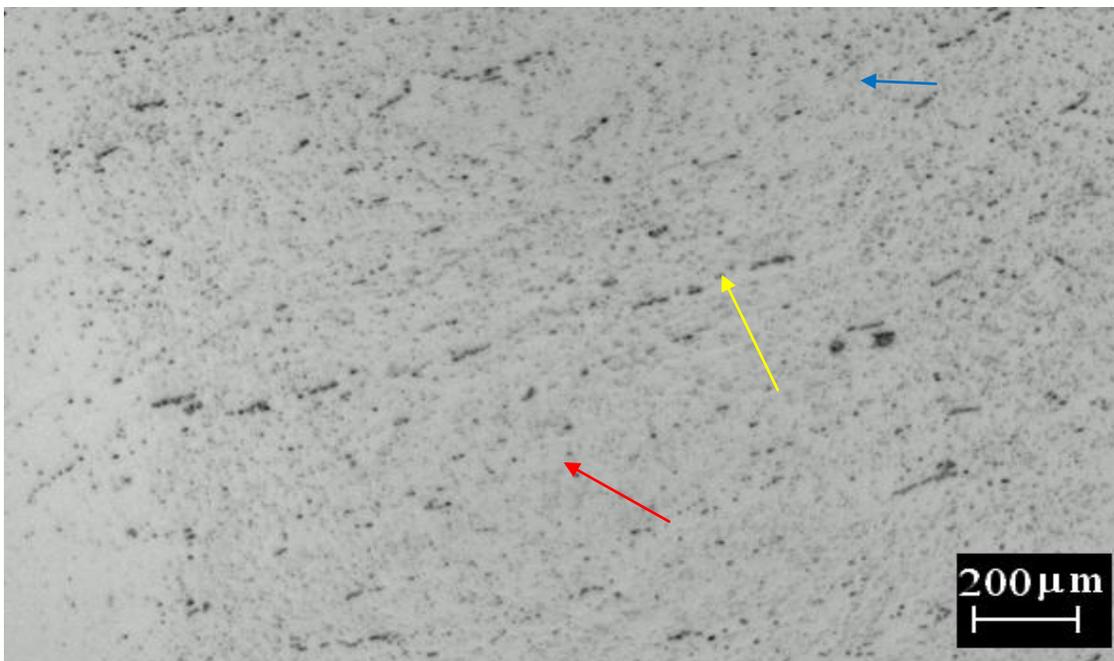


Fig. 22. Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J1 en la zona afectada por el calor.

La figura 22 muestra la microestructura observada en la muestra P-J2 en la zona afectada por el calor, en donde se observa la presencia de una matriz de color claro que corresponde a la austenita y cuyo tamaño promedio de grano es de 62

μm . Se observa la presencia de precipitados tanto en el límite de grano (flecha roja) como en la matriz (flecha azul) de la austenita. También se observa la presencia de precipitados alineados en la dirección de deformación (flecha amarilla).

Probeta P-J1 en la condición de soldadura-Material Base.

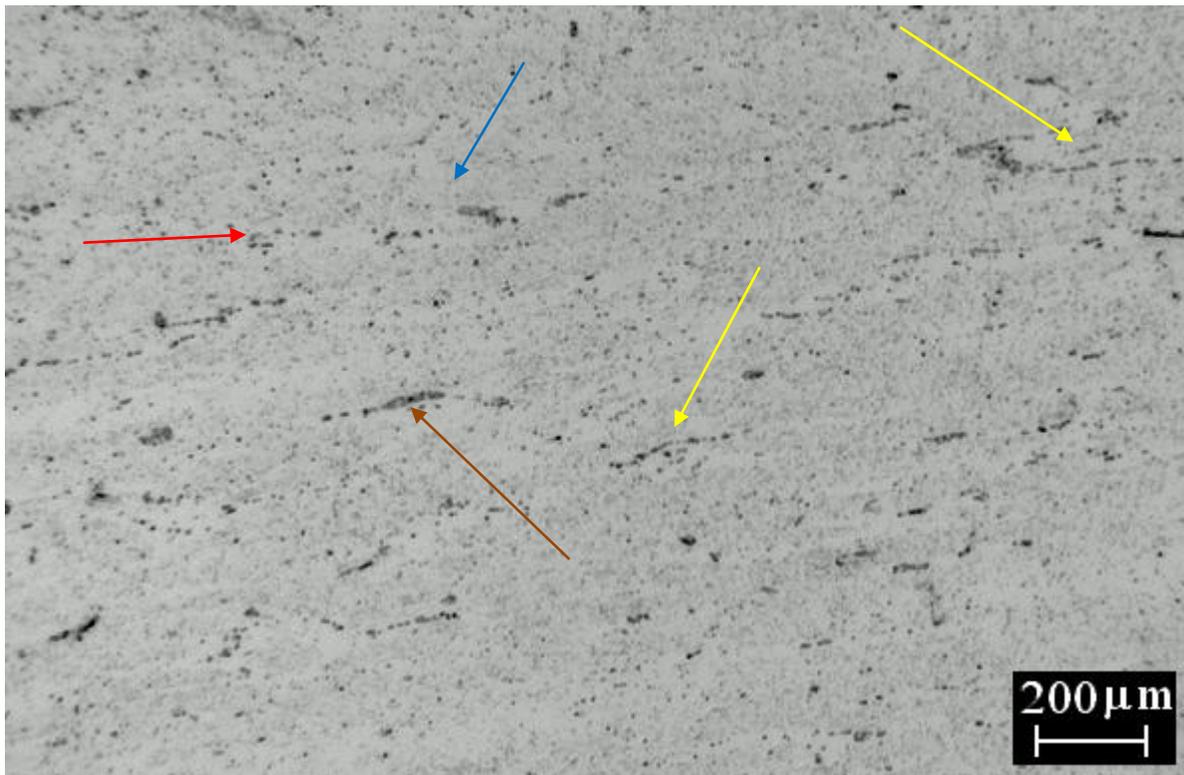


Fig. 23. Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J1 en el material base.

La figura 23 muestra la microestructura observada en la muestra P-J1 en el material base, en donde se observa la presencia de una matriz de color claro que

corresponde a la austenita y cuyo tamaño promedio de grano es de 35 μm . Se observa también la presencia de precipitados tanto en el límite de grano (flecha roja) como en la matriz (flecha azul) de la austenita. También se observa la presencia de precipitados alineados en la dirección de deformación (flecha amarilla), e inclusiones no-metálicas como las señaladas con una flecha de color café.

Probeta P-J2 en la condición de soldadura-Cordón de Soldadura.

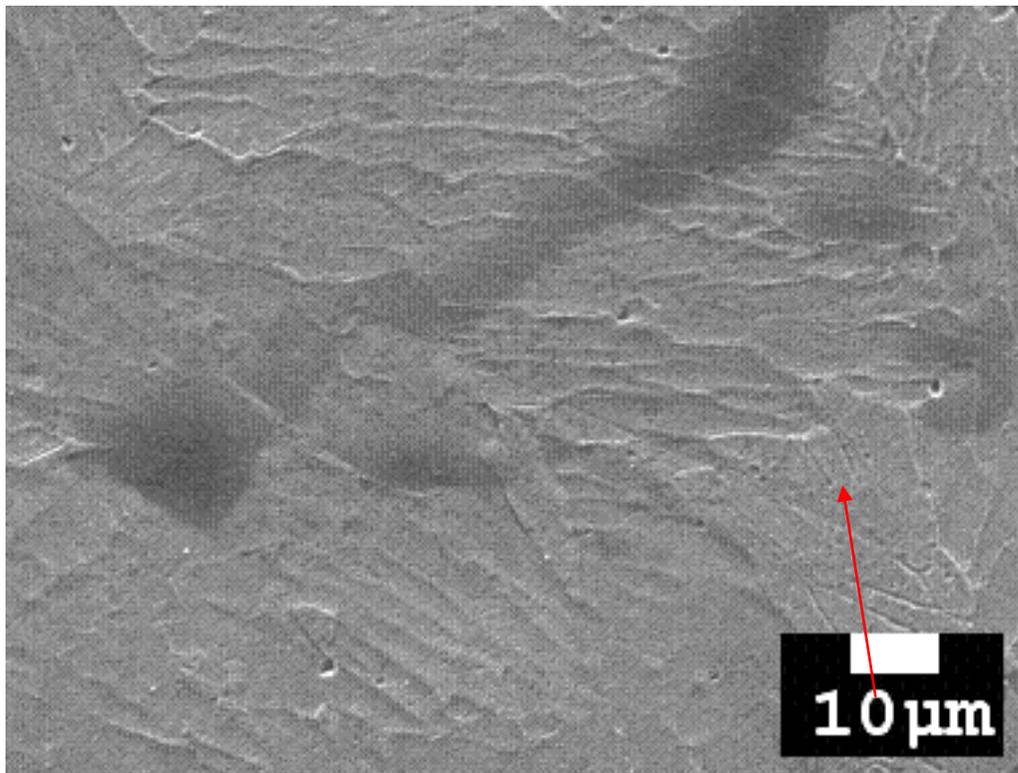


Fig.24. Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J2 en el cordón de soldadura.

La figura 24 muestra la microestructura observada en la muestra P-J2 en el cordón de soldadura, en donde se observa la presencia de una matriz austenítica. Como se puede observar, se tiene la presencia de carburos (señalado con una flecha

roja) en los límites de los brazos dendríticos. El tamaño promedio de estos brazos dendríticos es de 80 μm .

Probeta P-J2 en la condición de soldadura-Zona Afectada por el Calor.

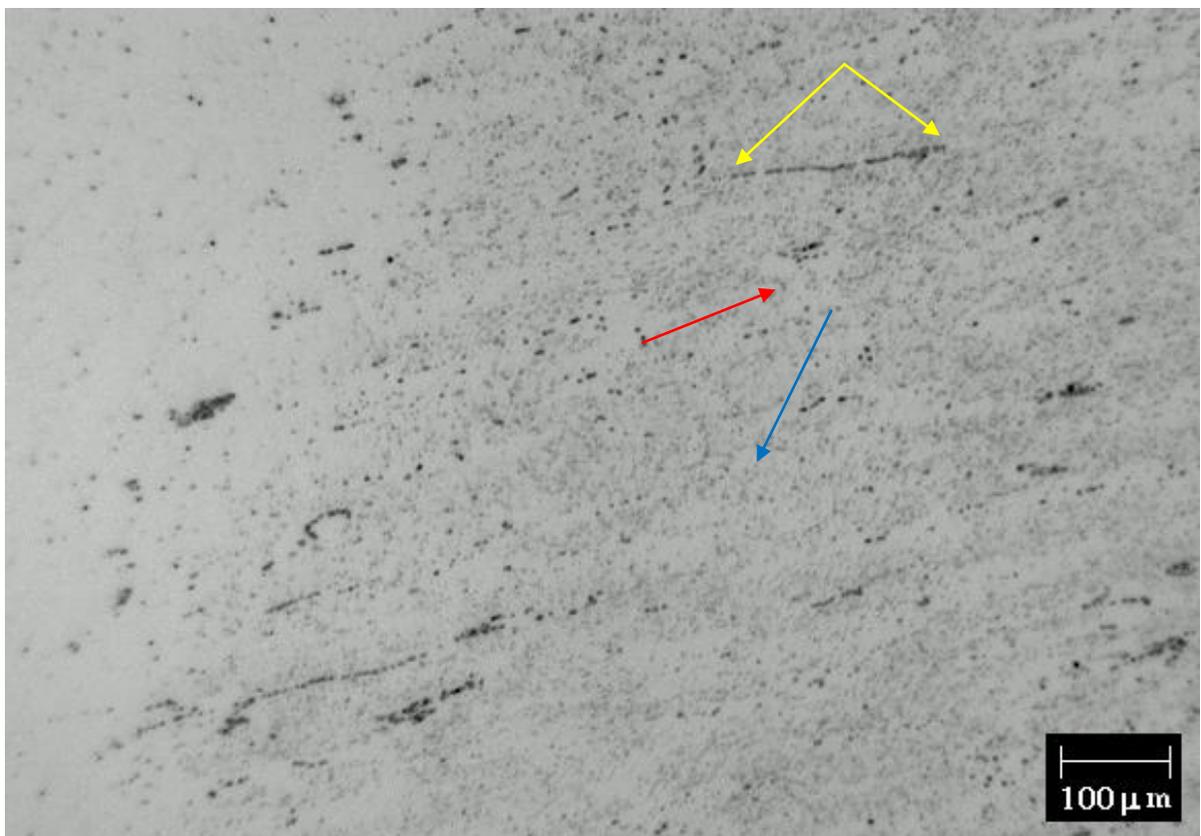


Fig. 25 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J2 en la zona afectada por el calor.

La figura 25 muestra la microestructura observada en la muestra P-J2 en la zona afectada por el calor, en donde se observa la presencia de una matriz de color claro que corresponde a la austenita y cuyo tamaño promedio de grano es de 60

μm . Se observa la presencia de precipitados tanto en el límite de grano (flecha roja) como en la matriz (flecha azul) de la austenita. También se observa la presencia de precipitados alineados en la dirección de deformación (flecha amarilla).

Probeta P-J2 en la condición de soldadura-Material Base.

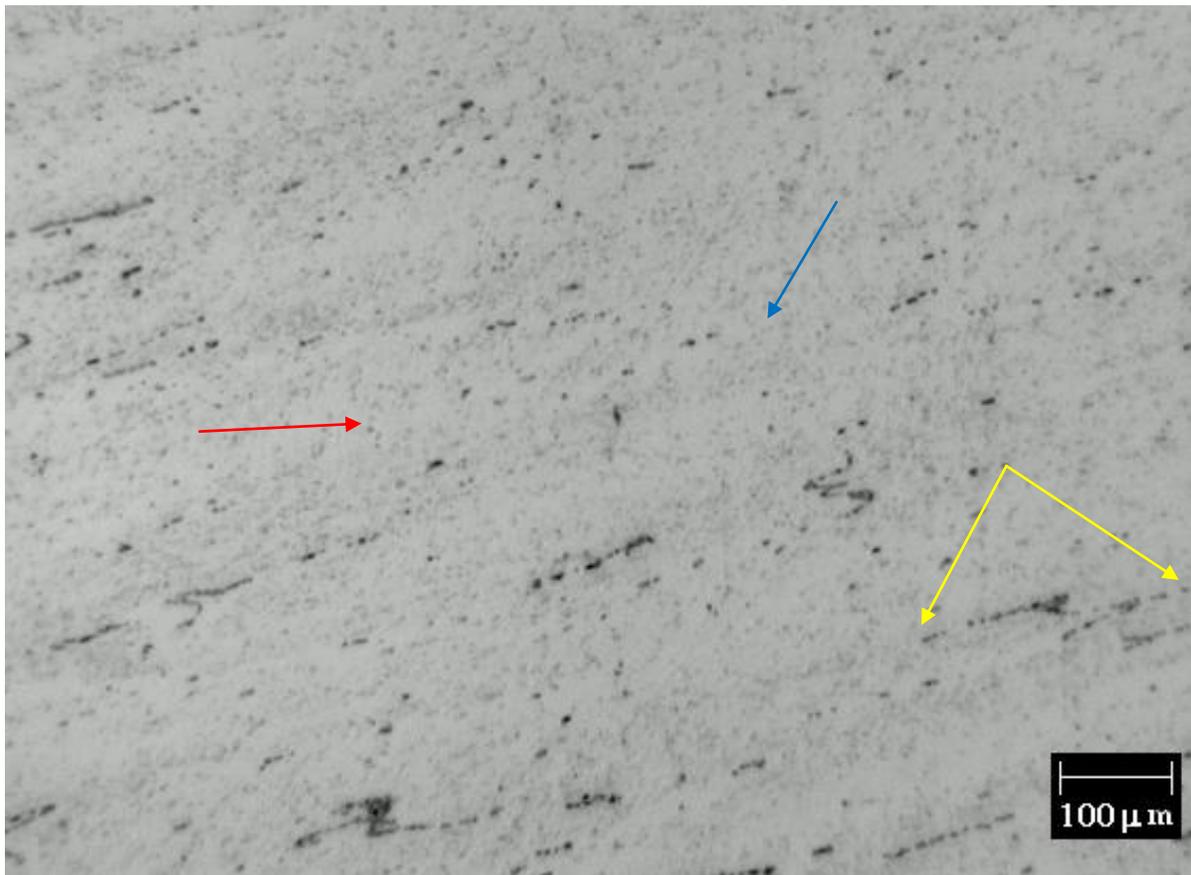


Fig. 26 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J2 en el material base.

La figura 26 muestra la microestructura observada en la muestra P-J2 en el material base, en donde se observa la presencia de una matriz de color claro que corresponde a la austenita y cuyo tamaño promedio de grano es de $53 \mu\text{m}$. Se

observa también la presencia de precipitados tanto en el límite de grano (flecha roja) como en la matriz (flecha azul) de la austenita. También se observa la presencia de precipitados alineados en la dirección de deformación (flecha amarilla).

Probeta P-J3 en la condición de soldadura-Cordón de Soldadura.

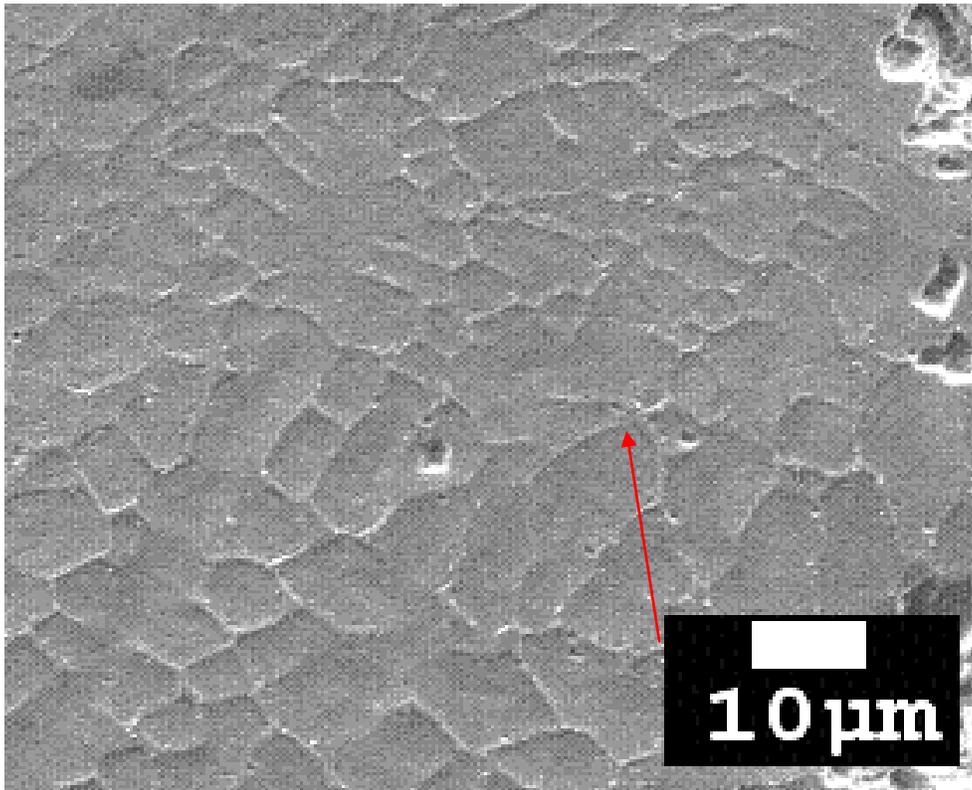


Fig. 27 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J3 en el cordón de soldadura.

La figura 27 muestra la microestructura observada en la muestra P-J3 en el cordón de soldadura, en donde se observa la presencia de una matriz de color claro que corresponde a la austenita. Como se puede observar, se tiene la presencia de carburos (señalado con una flecha roja) en los límites de los brazos dendríticos. El tamaño promedio de estos brazos dendríticos es de 85 μm.

Probeta P-J3 en la condición de soldadura-Zona Afectada por el Calor.

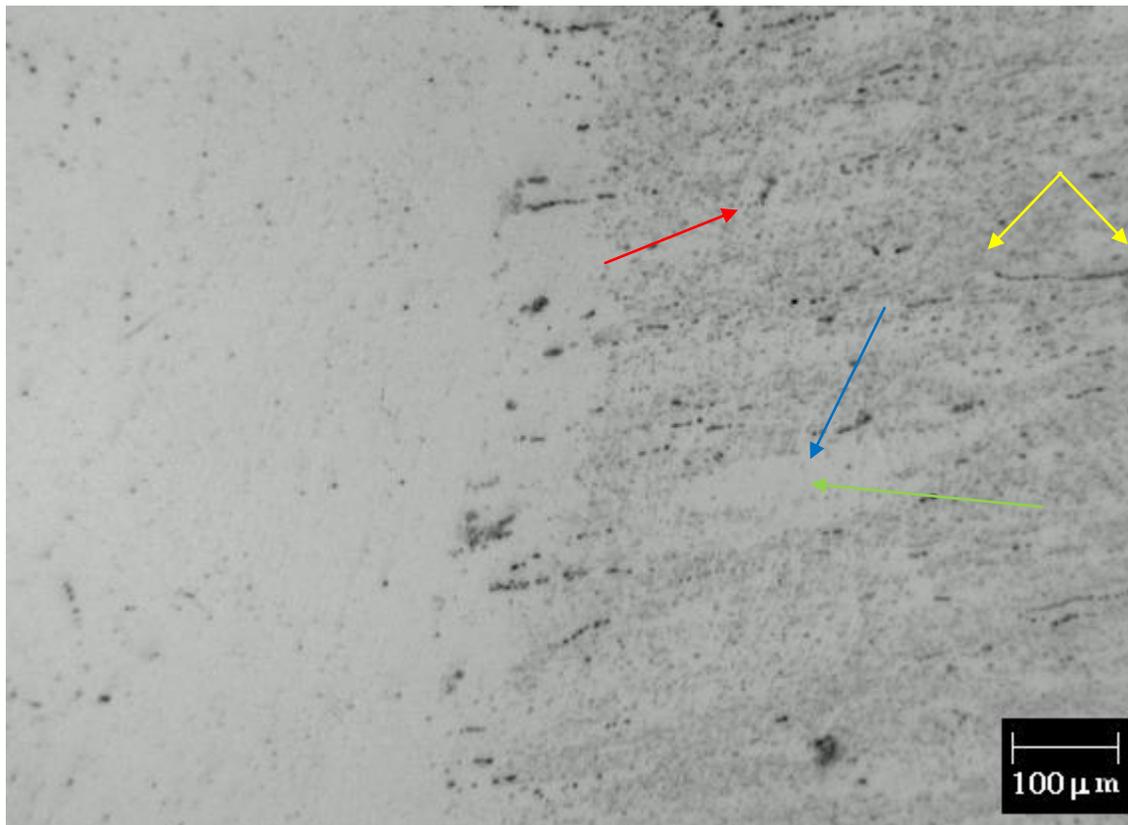


Fig. 28 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J3 en la zona afectada por el calor.

La figura 28 muestra la microestructura observada en la muestra P-J3 en la zona afectada por el calor, en donde se observa la presencia de una matriz de color claro que corresponde a la austenita y cuyo tamaño promedio de grano es de 68 μm . Se observa la presencia de precipitados tanto en el límite de grano (flecha roja) como en la matriz (flecha azul) de la austenita. También se observa la

presencia de precipitados alineados en la dirección de deformación (flecha amarilla). Y en algunas regiones (flecha verde) se observan granos alargados de austenita libre de precipitación.

Probeta P-J3 en la condición de soldadura-Material Base.

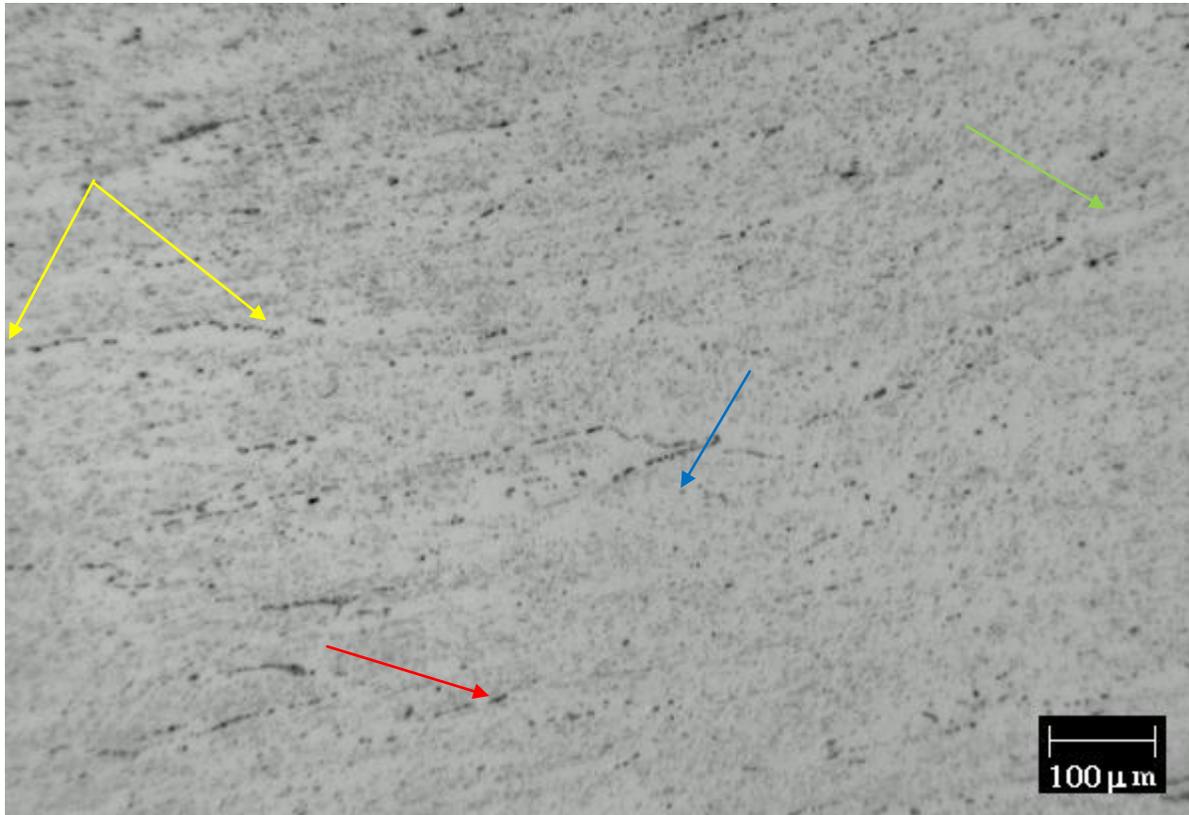


Fig.29 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J3 en el material base.

La figura 29 muestra la microestructura observada en la muestra P-J3 en el material base, en donde se observa la presencia de una matriz de color claro que corresponde a la austenita y cuyo tamaño promedio de grano es de 32 μm . Se observa también la presencia de precipitados tanto en el límite de grano (flecha roja) como en la matriz (flecha azul) de la austenita. También se observa la presencia de precipitados alineados en la dirección de deformación (flecha

amarilla) y se observa la presencia de granos austeníticos elongados en la dirección de deformación libres de precipitados (flecha verde).

Probeta P-J4 en la condición de soldadura-Cordón de Soldadura.

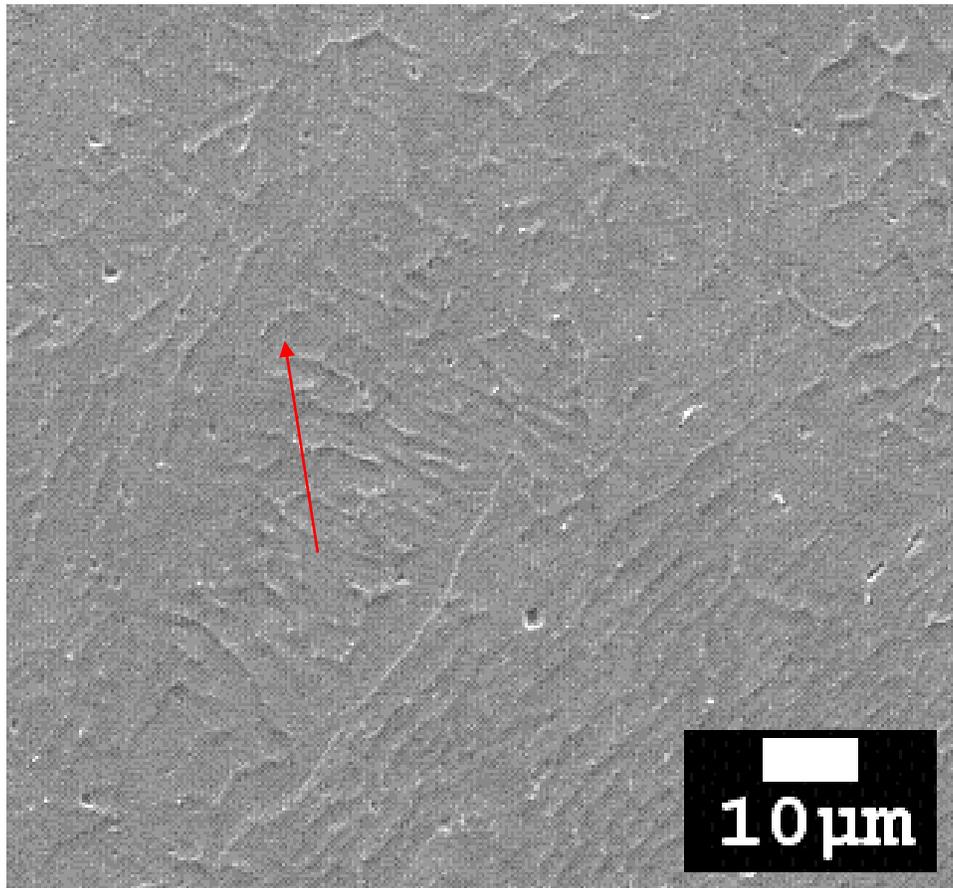


Fig. 30 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J4 en el cordón de soldadura.

La figura 30 muestra la microestructura observada en la muestra P-J4 en el cordón de soldadura, en donde se observa la presencia de una matriz de color claro que corresponde a la austenita. Como se puede observar, se tiene la presencia de carburos (señalado con una flecha roja) en los límites de los brazos dendríticos. El tamaño promedio de estos brazos dendríticos es de 81 μm.

Probeta P-J4 en la condición de soldadura-Zona Afectada por el Calor.

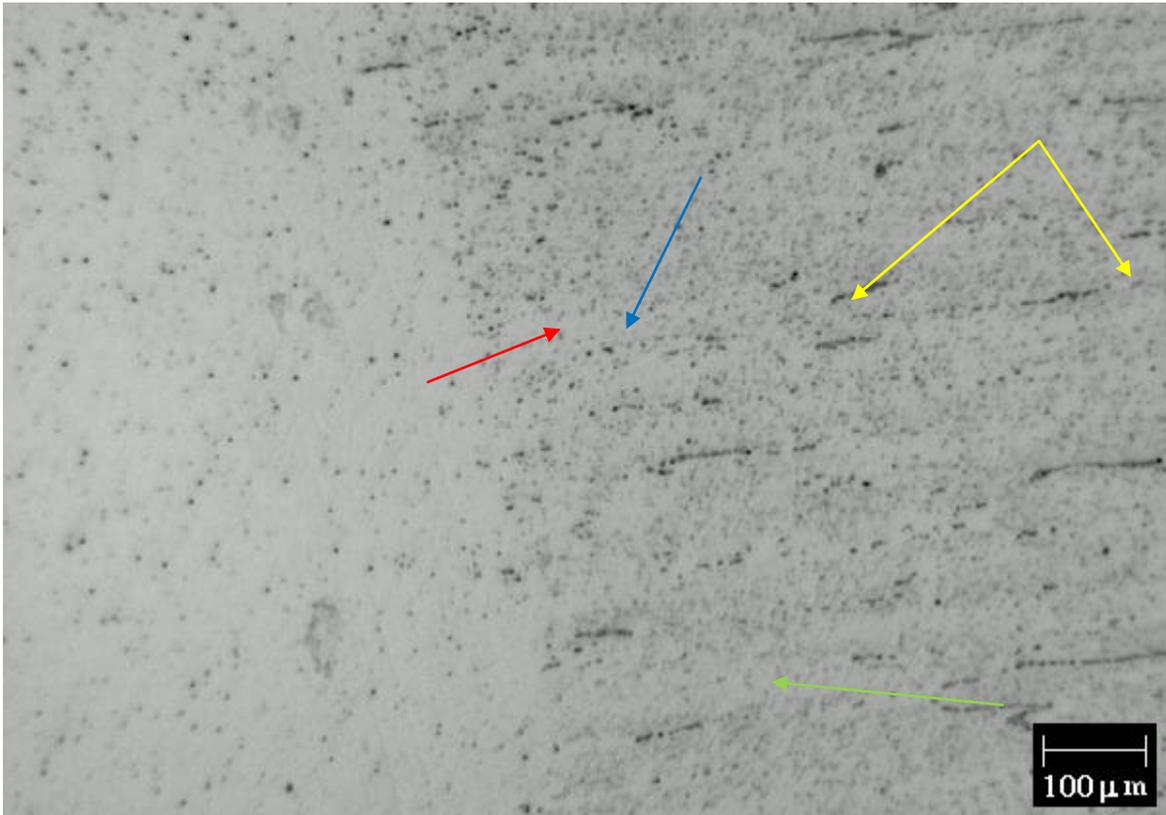


Fig.31 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J4 en la zona afectada por el calor.

La figura 31 muestra la microestructura observada en la muestra P-J4 en la zona afectada por el calor, en donde se observa la presencia de una matriz de color claro que corresponde a la austenita y cuyo tamaño promedio de grano es de 63 μm . Se observa la presencia de precipitados tanto en el límite de grano (flecha roja) como en la matriz (flecha azul) de la austenita. También se observa la presencia de precipitados alineados en la dirección de deformación (flecha amarilla). Y en algunas regiones (flecha verde) se observan granos elongados de austenita se observa una menor cantidad de precipitados.

Probeta P-J4 en la condición de soldadura-Material Base.

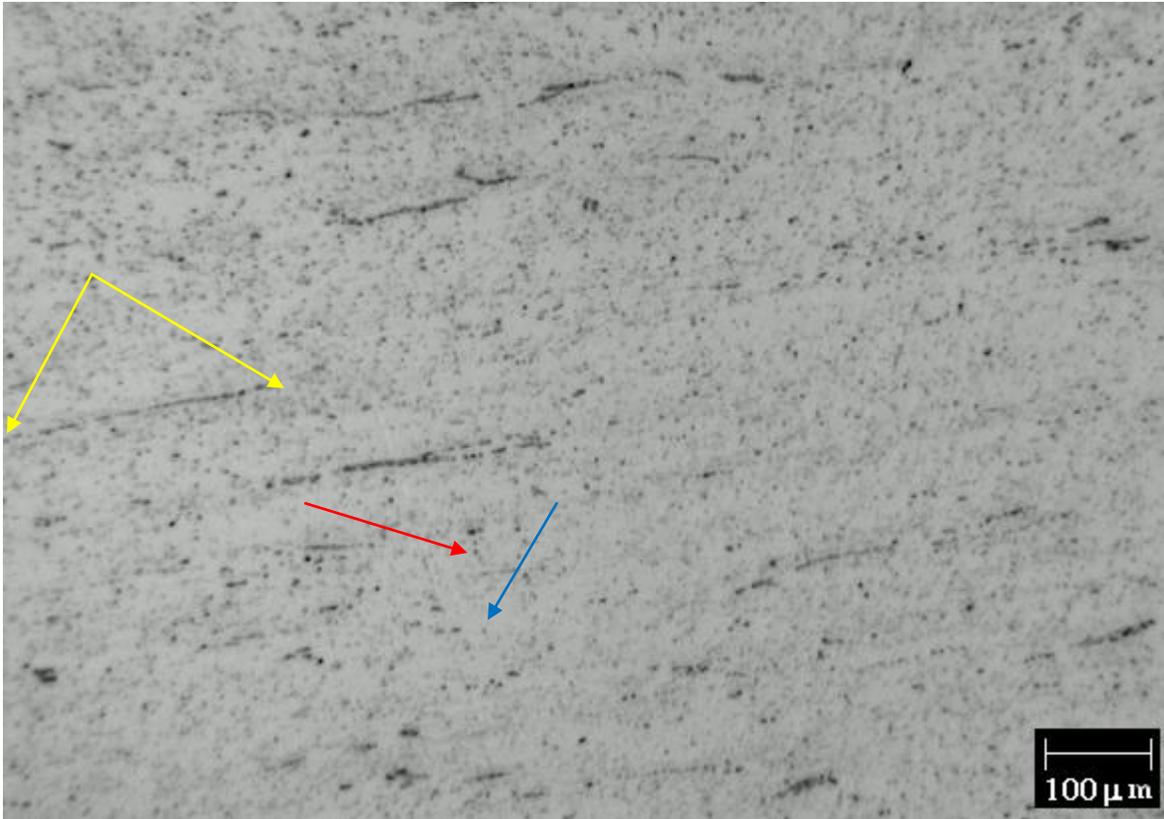


Fig. 32 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J4 en el material base.

La figura 32 muestra la microestructura observada en la muestra P-J4 en el material base, en donde se observa la presencia de una matriz de color claro que corresponde a la austenita y cuyo tamaño promedio de grano es de 30 μm . Se observa también la presencia de precipitados tanto en el límite de grano (flecha roja) como en la matriz (flecha azul) de la austenita. También se observa la presencia de precipitados alineados en la dirección de deformación (flecha amarilla).

Probeta P-J5 en la condición de soldadura-Cordón de Soldadura.

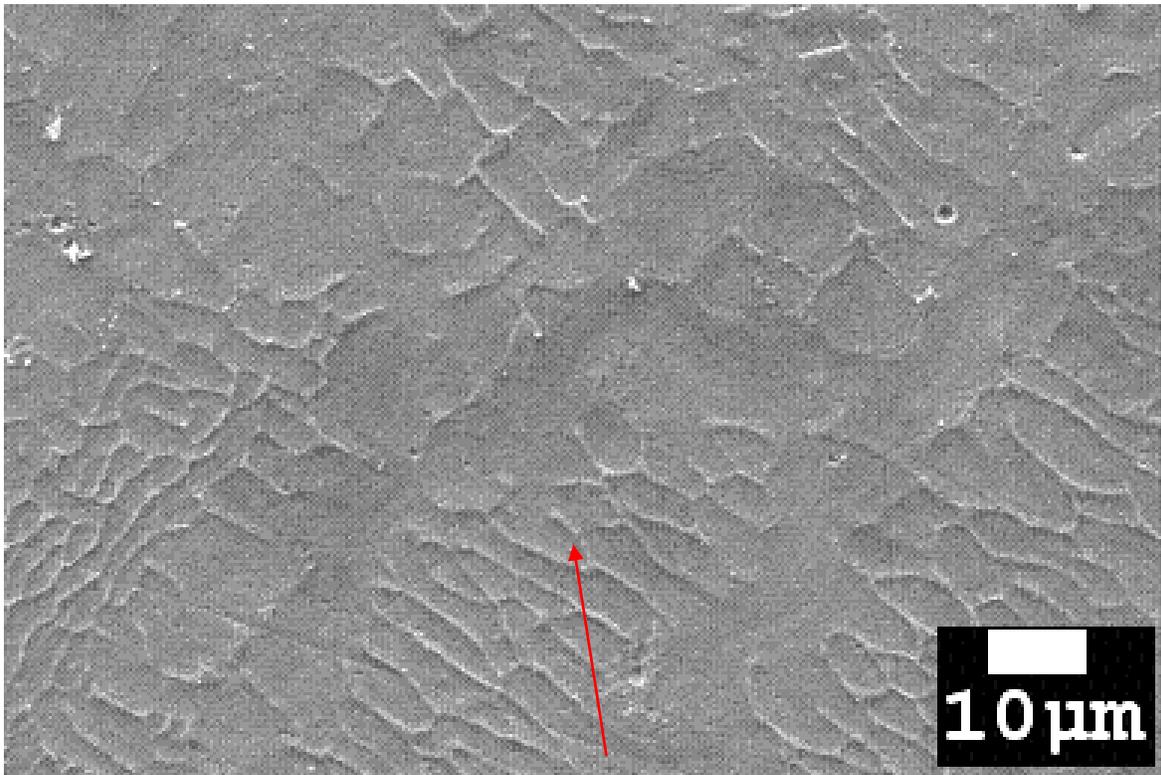


Fig. 33 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J5 en el cordón de soldadura.

La figura 33 muestra la microestructura observada en la muestra P-J5 en el cordón de soldadura, en donde se observa la presencia de una matriz de color claro que corresponde a la austenita. Como se puede observar, se tiene la presencia de carburos (señalado con una flecha roja) en los límites de los brazos dendríticos. El tamaño promedio de estos brazos dendríticos es de 86 μm.

Probeta P-J5 en la condición de soldadura-Zona Afectada por el Calor.

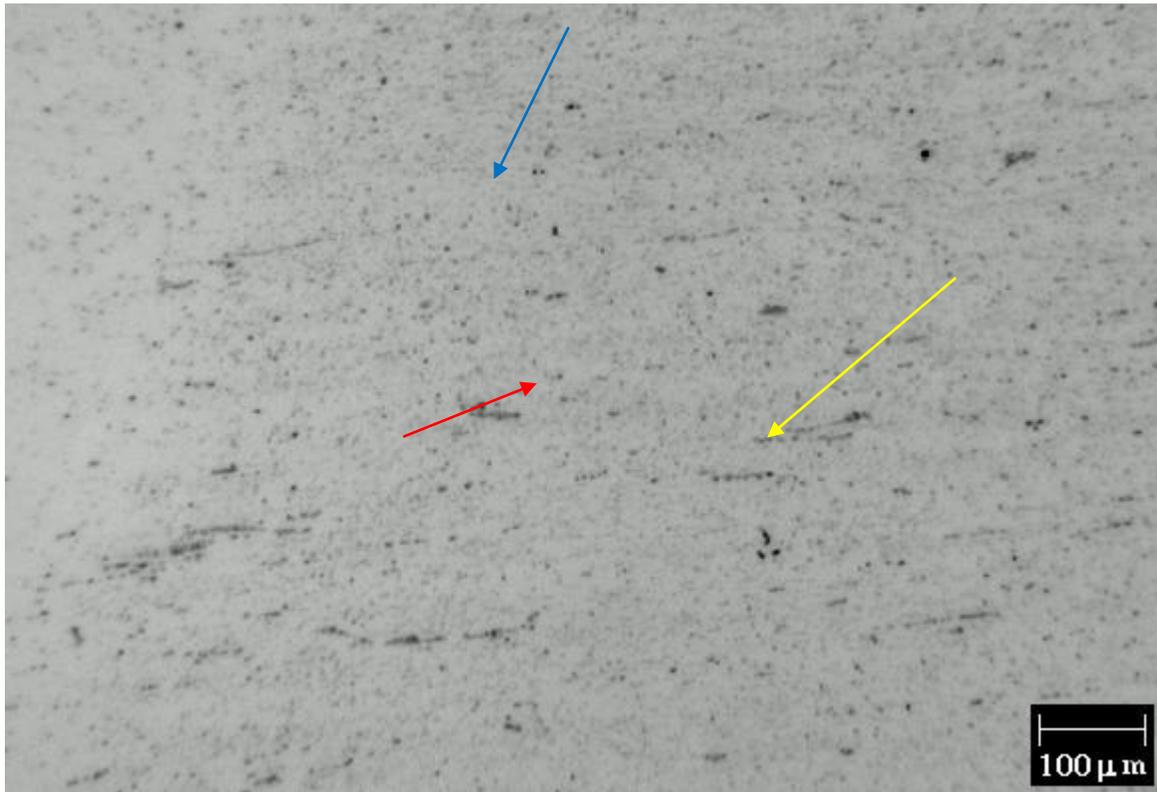


Fig. 34 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J5 en la zona afectada por el calor.

La figura 34 muestra la microestructura observada en la muestra P-5 en la zona afectada por el calor, en donde se observa la presencia de una matriz de color claro que corresponde a la austenita y cuyo tamaño promedio de grano es de 65 μm . Se observa la presencia de precipitados tanto en el límite de grano (flecha roja) como en la matriz (flecha azul) de la austenita. También se observa la presencia de precipitados alineados en la dirección de deformación (flecha amarilla).

Probeta P-J5 en la condición de soldadura-Material Base.

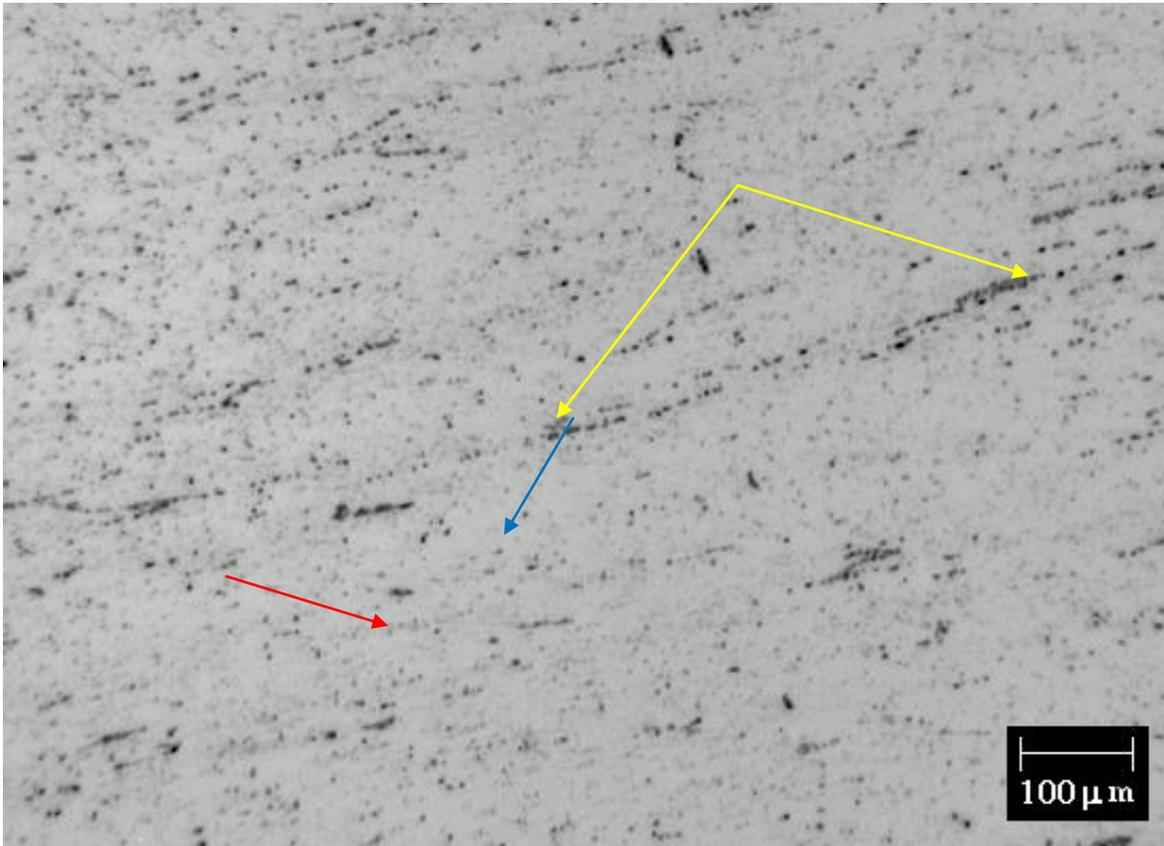


Fig. 35 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J5 en el material base.

La figura 35 muestra la microestructura observada en la muestra P-J5 en el material base, en donde se observa la presencia de una matriz de color claro que corresponde a la austenita y cuyo tamaño promedio de grano es de 31 μm . Se observa también la presencia de precipitados tanto en el límite de grano (flecha roja) como en la matriz (flecha azul) de la austenita. En esta muestra, se observa una mayor cantidad de precipitados alineados en la dirección de deformación (flecha amarilla).

Probeta P-J6 en la condición de soldadura-Cordón de Soldadura.

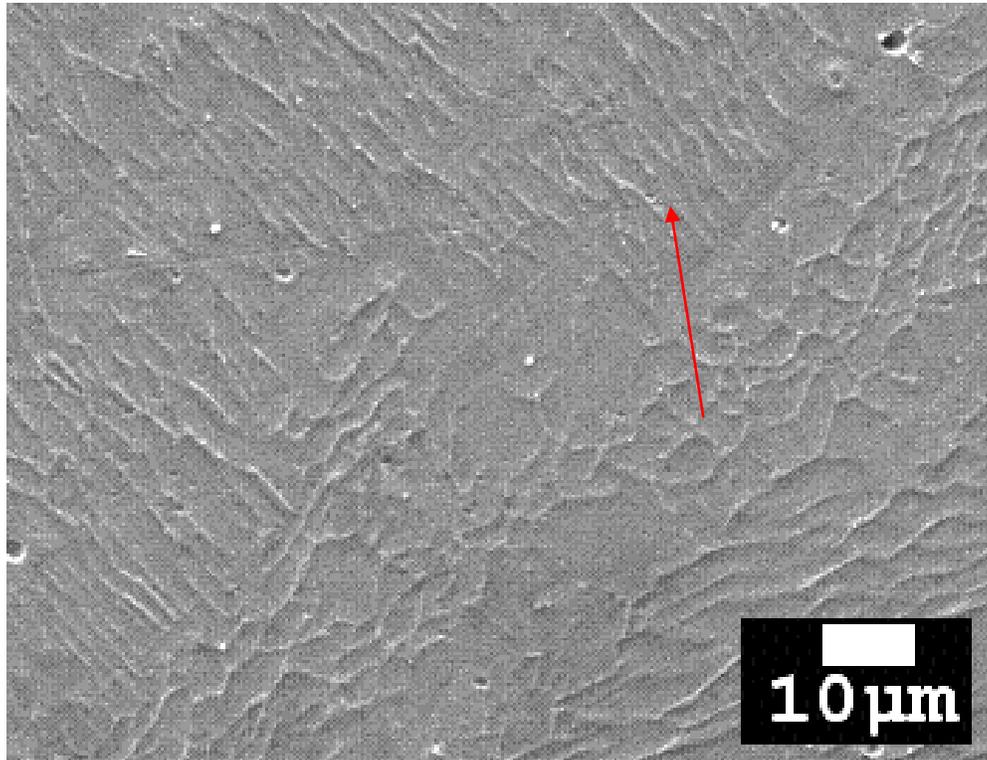


Fig. 36 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J6 en el cordón de soldadura.

La figura 36 muestra la microestructura observada en la muestra P-J6 en el cordón de soldadura, en donde se observa la presencia de una matriz de color claro que corresponde a la austenita. Como se puede observar, se tiene la presencia de carburos (señalado con una flecha roja) en los límites de los brazos dendríticos. El tamaño promedio de estos brazos dendríticos es de 80 μm.

Probeta P-J6 en la condición de soldadura-Zona Afectada por el Calor.

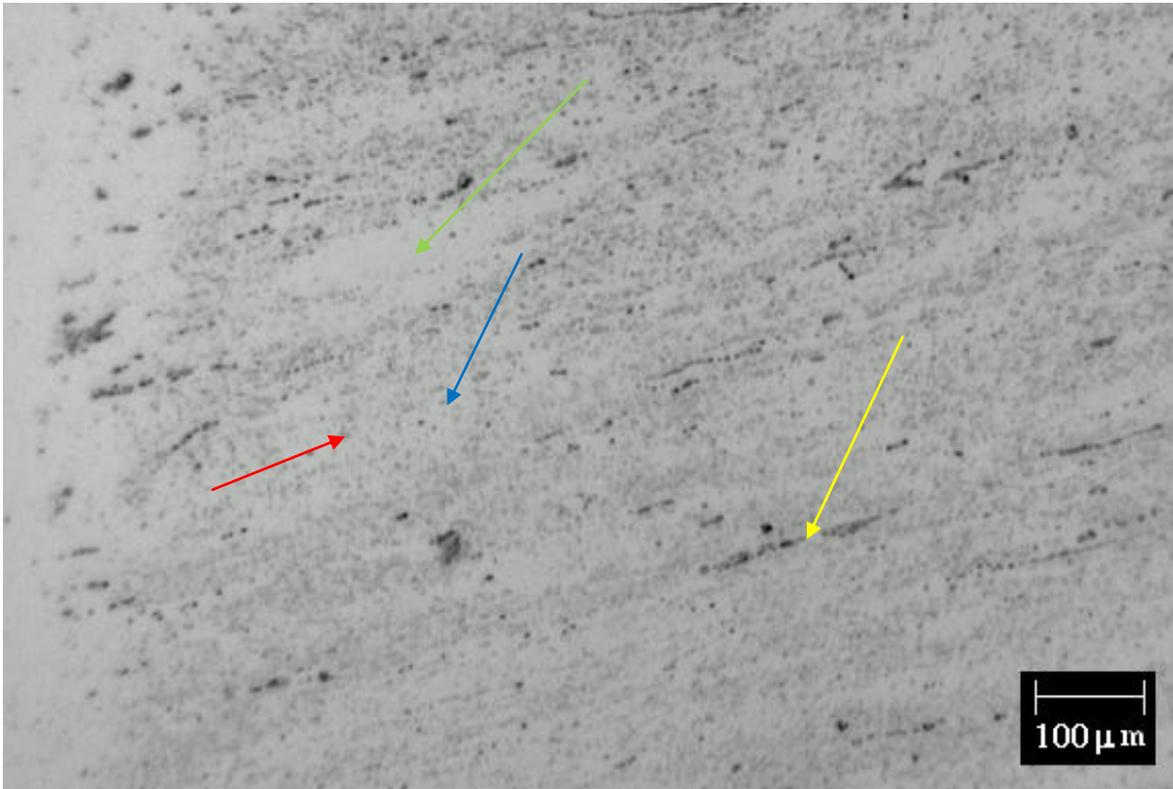


Fig.37 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J6 en la zona afectada por el calor.

La figura 37 muestra la microestructura observada en la muestra P-6 en la zona afectada por el calor, en donde se observa la presencia de una matriz de color claro que corresponde a la austenita y cuyo tamaño promedio de grano es de 67 μm . Se observa la presencia de precipitados tanto en el límite de grano (flecha roja) como en la matriz (flecha azul) de la austenita. También se observa la presencia de precipitados alineados en la dirección de deformación (flecha amarilla) y algunas regiones de granos elongados libre de precipitados (flecha verde).

Probeta P-J6 en la condición de soldadura-Material Base.

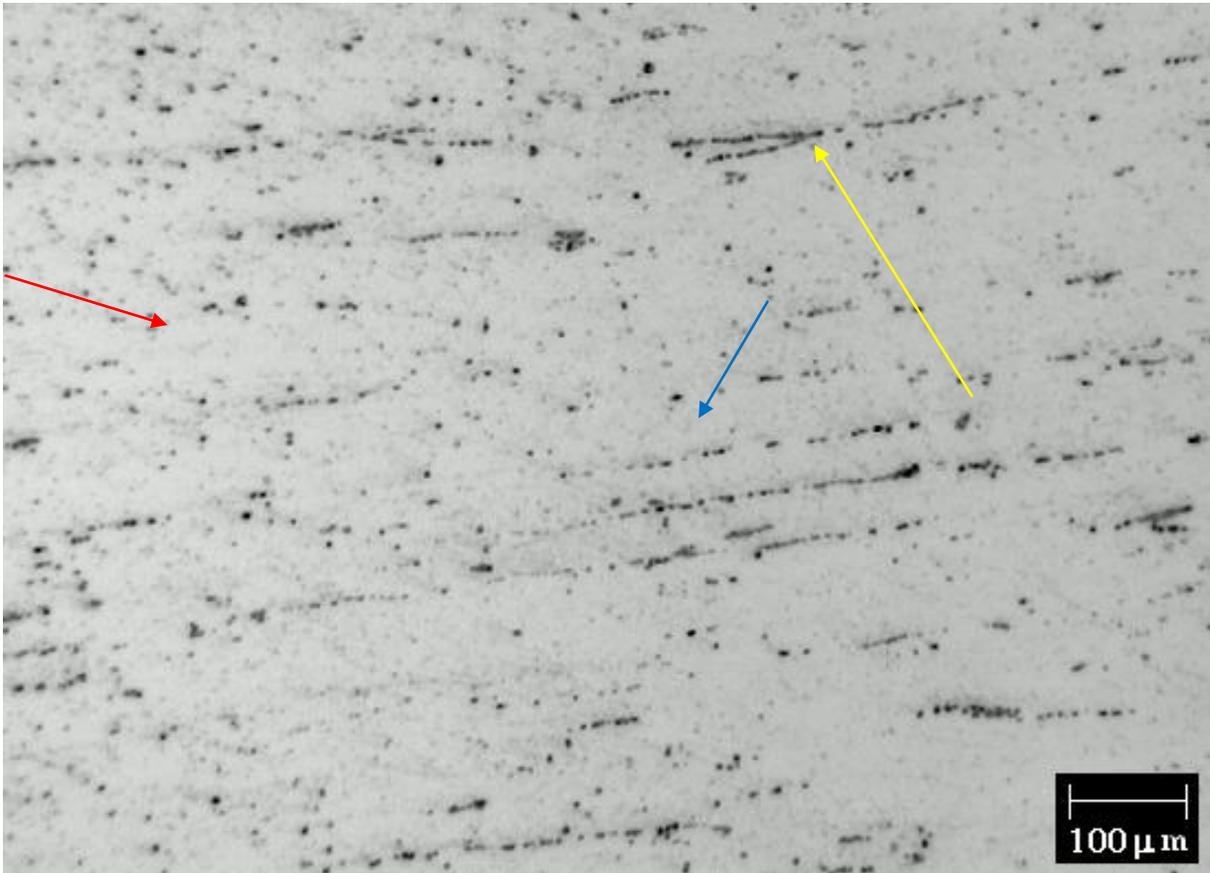


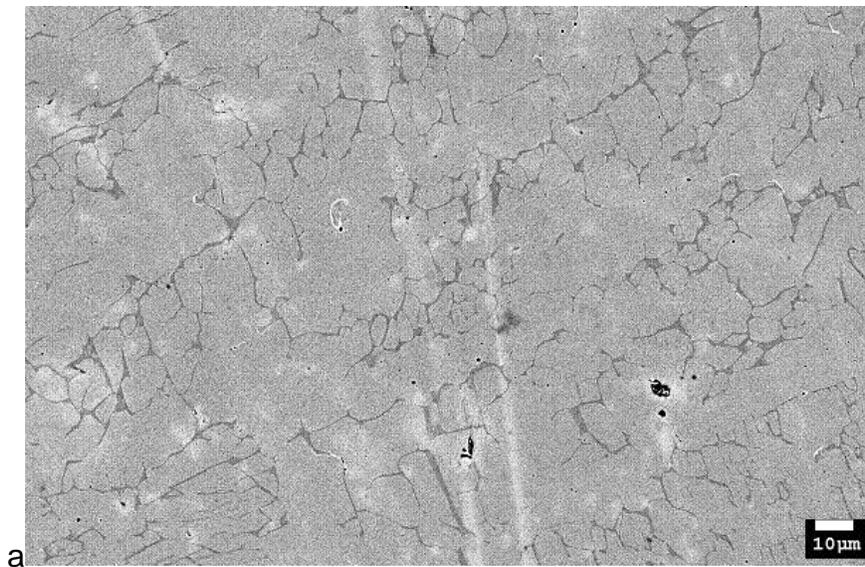
Fig.38 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J6 en el material base.

La figura 38 muestra la microestructura observada en la muestra P-J6 en el material base, en donde se observa la presencia de una matriz de color claro que corresponde a la austenita y cuyo tamaño promedio de grano es de 30 μm . Se observa también la presencia de precipitados tanto en el límite de grano (flecha roja) como en la matriz (flecha azul) de la austenita. En esta muestra, se observa una mayor cantidad de precipitados alineados en la dirección de deformación (flecha amarilla).

4.1.1 Análisis microestructural del cordón de soldadura

Durante la solidificación de metales y aleaciones binarias o multifásicas, se puede obtener una estructura monofásica, celular, dendrítica celular, dendrítica columnar,

estructura en bandas o libre de segregación (frente plano). La generación de una estructura en particular depende de valores como lo son la concentración de la aleación, C_0 , su temperatura de liquidus, T_L , la constante de partición, $k=C_L/C_S$, el coeficiente de difusión de los elementos solutales en Fe, D_L , el coeficiente de Gibbs-Thompson, la velocidad de solidificación, $V_{S/L}$ y el gradiente de temperatura en el líquido, G_L . De estos parámetros, los únicos que se pueden variar experimentalmente o en campo son: 1) la velocidad de solidificación, $V_{S/L}$ y 2) el gradiente de temperatura en el líquido, G_L .



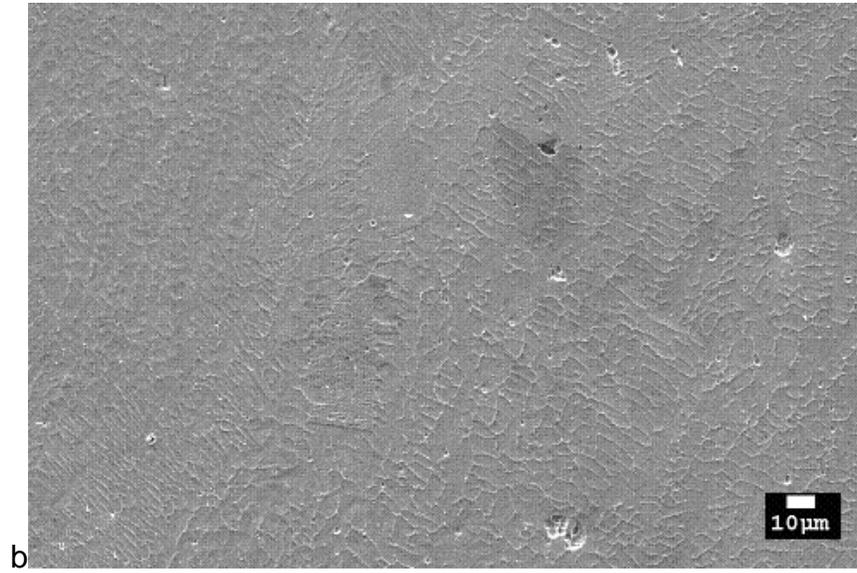


Fig. 39 Estructuras dendríticas obtenidas en el cordón de soldadura (a) Procedimiento GTAW-SMAW y (b) Condisa-GTAW.

La figura 39 muestra la microestructura obtenida después de haber aplicado dos procedimientos de soldadura a placas de acero del tipo SA-312 TP 347, en donde se observa la presencia de una estructura del tipo dendrítico columnar. La presencia de este tipo de estructura tiene lugar cuando el gradiente de temperatura en el líquido, G_L , es grande y entre más grande sea este gradiente de temperatura en el líquido durante el proceso de soldadura, se pueden generar regiones segregadas con altos contenidos de soluto.

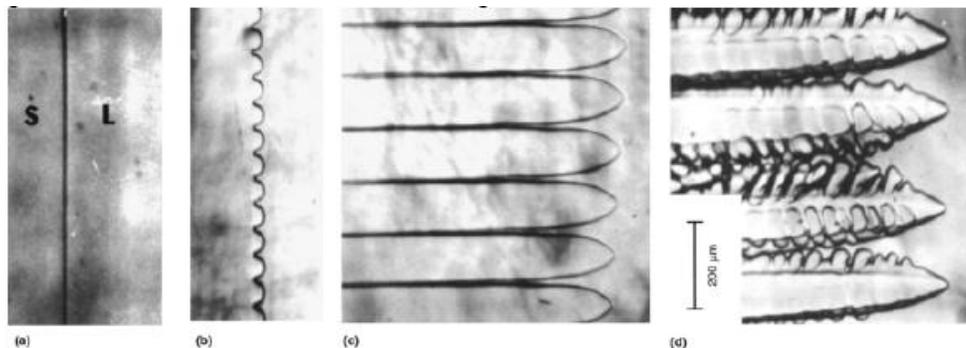


Fig. 40 Microestructuras de solidificación.

La figura 40 muestra el efecto de la velocidad de avance de la interfase sólido/líquido, sobre la estructura resultante, en donde se muestra que para una misma concentración de la aleación se obtienen (a) estructuras planas, (b, c) celulares o (d) dendríticas.

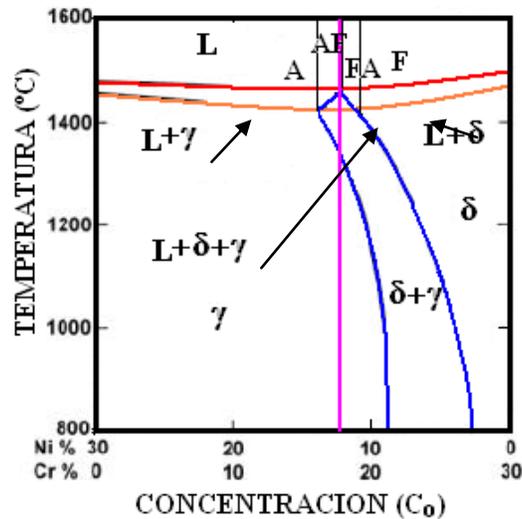


Fig. 41 Sección pseudobinaria del diagrama ternario Fe–Cr–Ni a 70 % en peso de Fe, mostrando los modos de solidificación: A – completamente austenítico, AF - austenítico–ferrítica, FA – ferrítica–austenítico y F – completamente ferrítica.

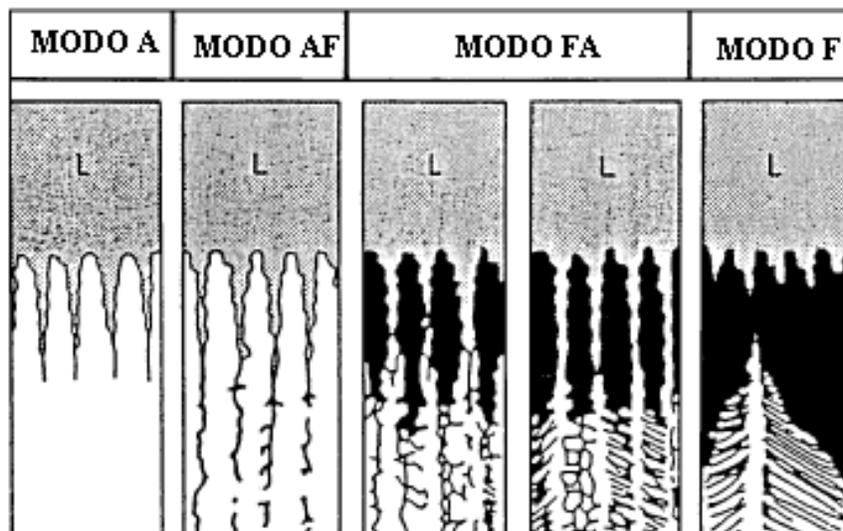


Fig. 42 Representación esquemática de los modos de solidificación en soldaduras de aceros inoxidables austeníticos.

La figura 42 muestra como la fase que solidifica inicialmente, está determinada por la concentración de la aleación, la cual bajo condiciones de equilibrio procede hacia el eutéctico/peritético antes de que la aleación solidifique completamente. En la mayoría de los aceros inoxidables en uso, su solidificación ocurre en el lado rico del Fe en el diagrama ternario Fe-Cr-Ni, en donde se consideran 4 distintos modos de solidificación: Austenítico (A), austenítico–ferrítico o austenita primaria (AF), ferrítico-austenítico o ferrita primaria (FA) y ferrítico (F). Los rangos aproximados de composición bajo los cuales ocurren estos modos se muestran en la figura (tome en consideración que este diagrama se modifica con la adición de otros elementos como lo es el Mo), mientras que la figura 28 muestra la microestructura y morfología de las fases durante y después de la solidificación.

Las aleaciones que solidifican bajo el modo A continúan sin cambio a bajas temperaturas, mientras que aquellas solidificando en el modo AF pueden formar algo de ferrita eutéctica, como se muestra en la figura 30.

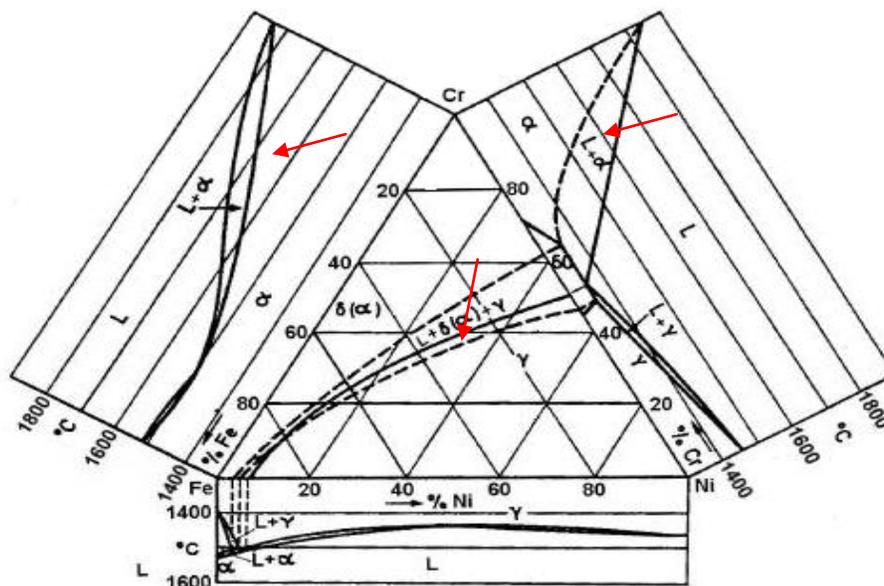


Fig. 43 Proyecciones de liquidus y solidus del sistema Fe-Cr-Ni, mostrando los constituyentes de los diagramas binarios.

La composición de las aleaciones que solidifican en los modos FA y F (como ocurre en el acero bajo estudio) pasan a través de la región bifásica $\delta \leftrightarrow \gamma$ y re-entran al campo monofásico γ . Esto es debido a la asimetría del campo bifásico mostrado en la figura 43.

Bajo condiciones de solidificación fuera del equilibrio, las cuales prevalecen durante las soldaduras de los aceros inoxidable, la segregación altera las fases y su composición. En estos aceros inoxidable austeníticos, dependiendo de la velocidad de solidificación y su gradiente de temperatura en el líquido, las regiones interdendríticas se ven enriquecidas en soluto (Cr y Ni). Cuando solidifican en el modo AF, las regiones interdendríticas del cordón de soldadura se ve significativamente enriquecido en Cr con un empobrecimiento de Ni. Cuando el modo de solidificación es FA y F, el núcleo de la dendrita se ve ligeramente enriquecida en Cr y empobrecida en Ni.

4.2 Propiedades mecánicas a temperatura ambiente y a 450°C.

Probeta P-J1 T=25°C

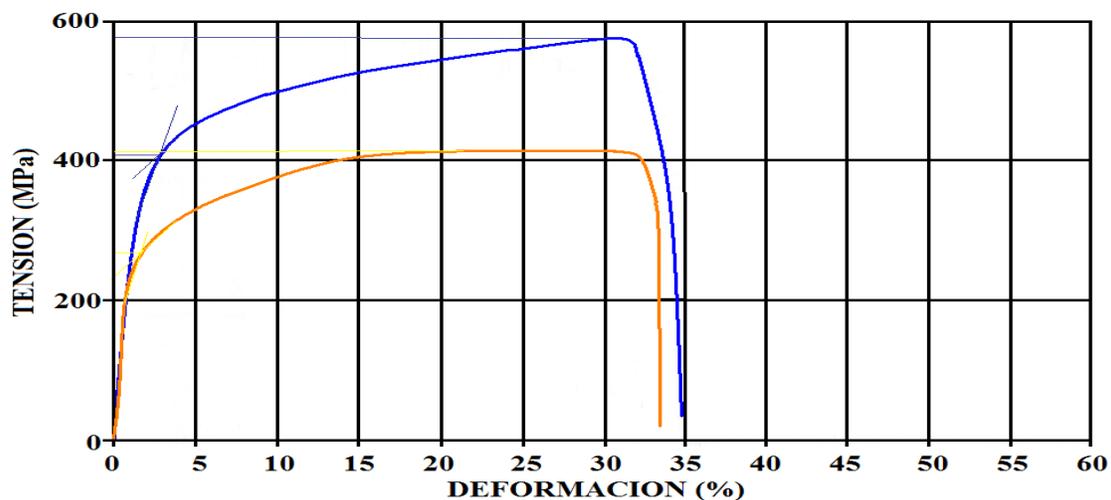


Fig. 44 Curva Tensión-Deformación para la muestra P-J1 a 25°C (línea azul) y a 450°C (línea anaranjada).

Las figura 44 muestra las curvas tensión-deformación para la muestra P-J1 a 25°C y a 450°C, como se puede observar, el límite de cedencia a 25°C es de 404.6 MPa, mientras que a 450°C, este valor disminuye a 268.3 MPa. El valor de ultima resistencia a la tensión a 25°C es de 579.0 MPa mientras que a 450°C disminuye a 410.1 MPa. La elongación a 25°C es de 34.8% y a 450°C disminuye a 33.7%.

Probeta P-J2

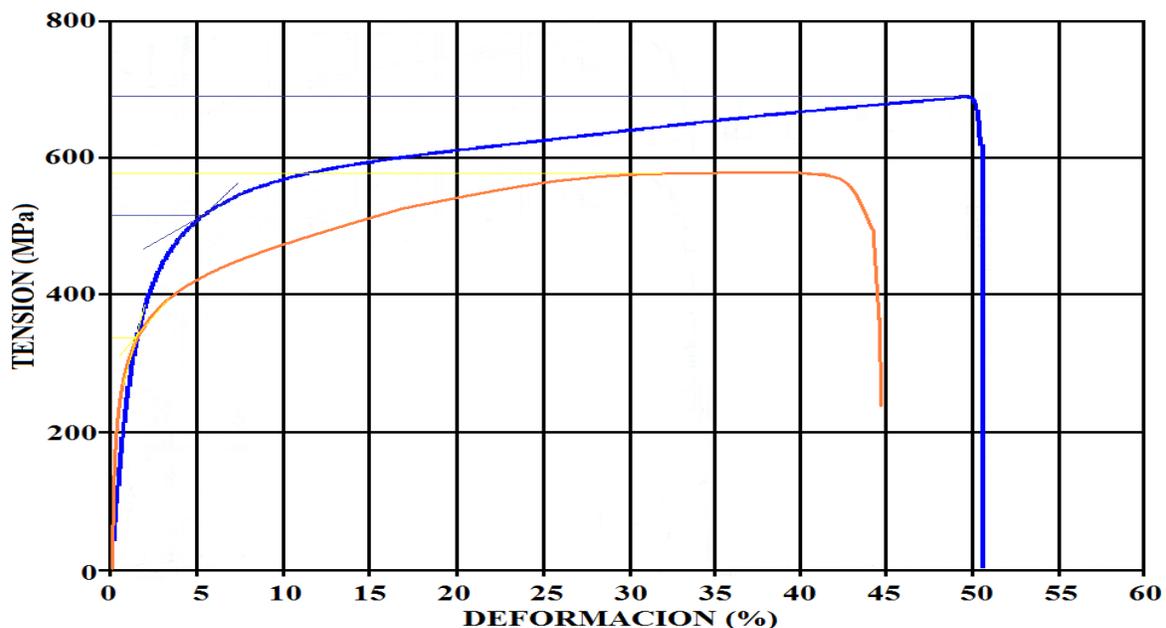


Fig. 45 Curva Tensión-Deformación para la muestra P-J2 a 25°C (línea azul) y a 450°C (línea anaranjada).

Las figura 45 muestra las curvas tensión-deformación para la muestra P-J2 a temperatura ambiente (25°C) y a 450°C, como se puede observar, el límite de cedencia a 25°C es de 515.0 MPa, mientras que a 450°C, este valor disminuye a 342.8 MPa. El valor de ultima resistencia a la tensión a 25°C es de 692.0 MPa mientras que a 450°C disminuye a 572.2 MPa. La elongación a 25°C es de 51.7% y a 450°C disminuye a 45.0%.

Probeta P-J3

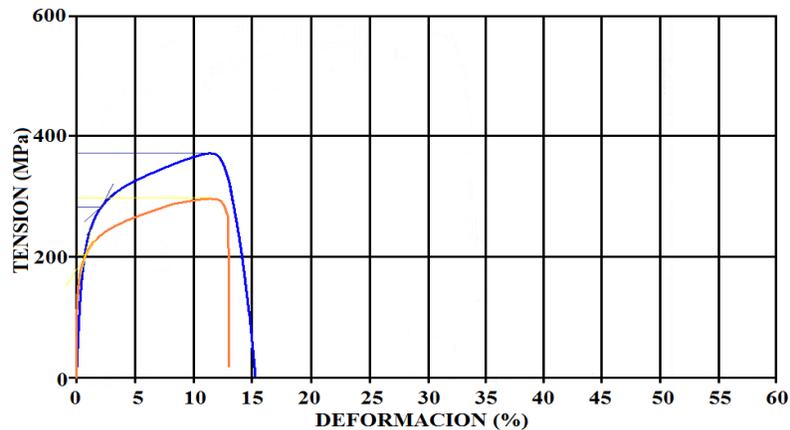


Fig. 46 Curva Tensión-Deformación para la muestra P-J3 a 25°C (línea azul) y a 450°C (línea anaranjada), tratada térmicamente.

Las figura 46 muestra las curvas tensión-deformación para la muestra P-J3 (tratada térmicamente) a temperatura ambiente (25°C) y a 450°C, como se puede observar, el límite de cedencia a 25°C es de 241.30 MPa, mientras que a 450°C, este valor disminuye a 200.5 MPa. El valor de ultima resistencia a la tensión a 25°C es de 388.5 MPa mientras que a 450°C disminuye a 295.2 MPa. La elongación a 25°C es de 15.1% y a 450°C disminuye a 13.0%.

Probeta P-J4

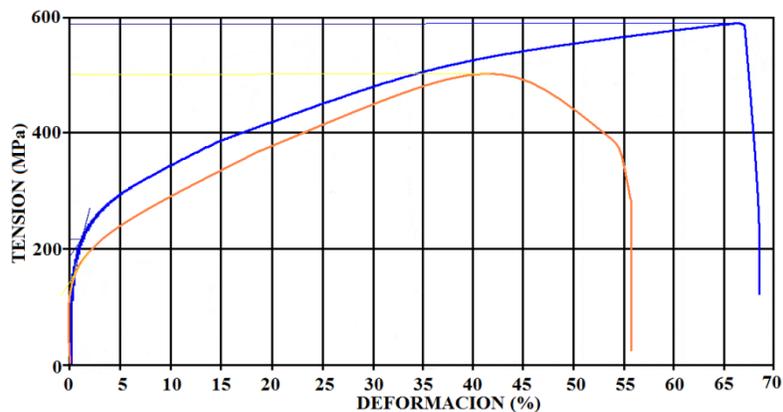


Fig. 47 Curva Tensión-Deformación para la muestra P-J4 a 25°C (línea azul) y a 450°C (línea anaranjada).

La figura 47 muestra las curvas tensión-deformación para la muestra P-4 (tratada térmicamente) a temperatura ambiente (25°C) y a 450°C, como se puede

observar, el límite de cedencia a 25°C es de 217.1 MPa, mientras que a 450°C, este valor disminuye a 194.4 MPa. El valor de ultima resistencia a la tensión a 25°C es de 598.0 MPa mientras que a 450°C disminuye a 474.7 MPa. La elongación a 25°C es de 68.0% y a 450°C disminuye a 56.2%.

Probeta P-J5

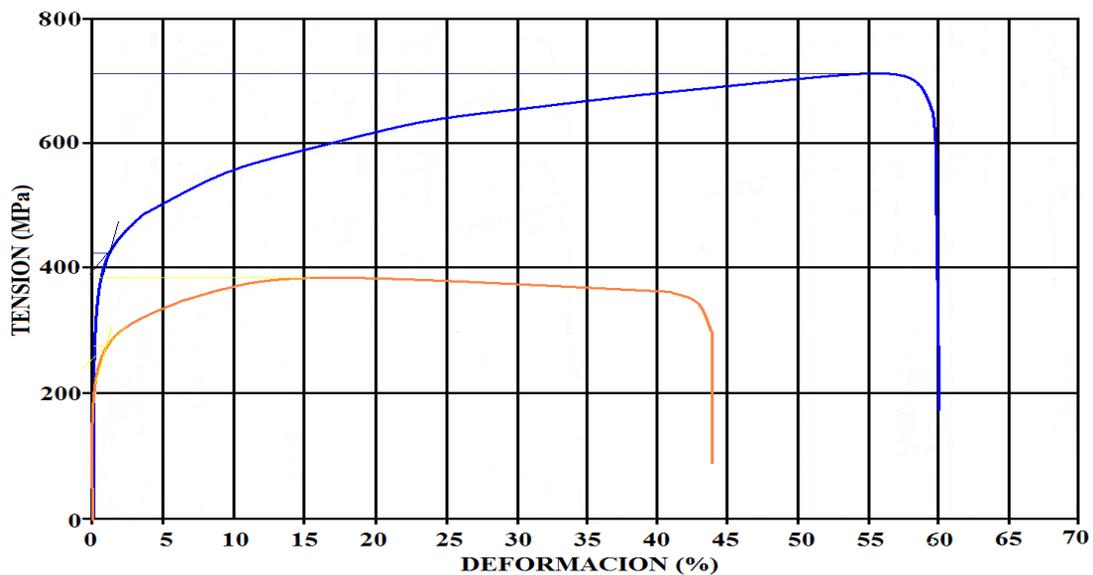


Fig. 48 Curva Tensión-Deformación para la muestra P-J5 a 25°C (línea azul) y a 450°C (línea anaranjada).

Las figura 48 muestra las curvas tensión-deformación para la muestra P-J5 (tratada térmicamente) a temperatura ambiente (25°C) y a 450°C, como se puede observar, el límite de cedencia a 25°C es de 411.0 MPa, mientras que a 450°C, este valor disminuye a 274.2 MPa. El valor de ultima resistencia a la tensión a 25°C es de 682.0 MPa mientras que a 450°C disminuye a 382.8 MPa. La elongación a 25°C es de 60.0% y a 450°C disminuye a 44.0%.

Probeta P-J6

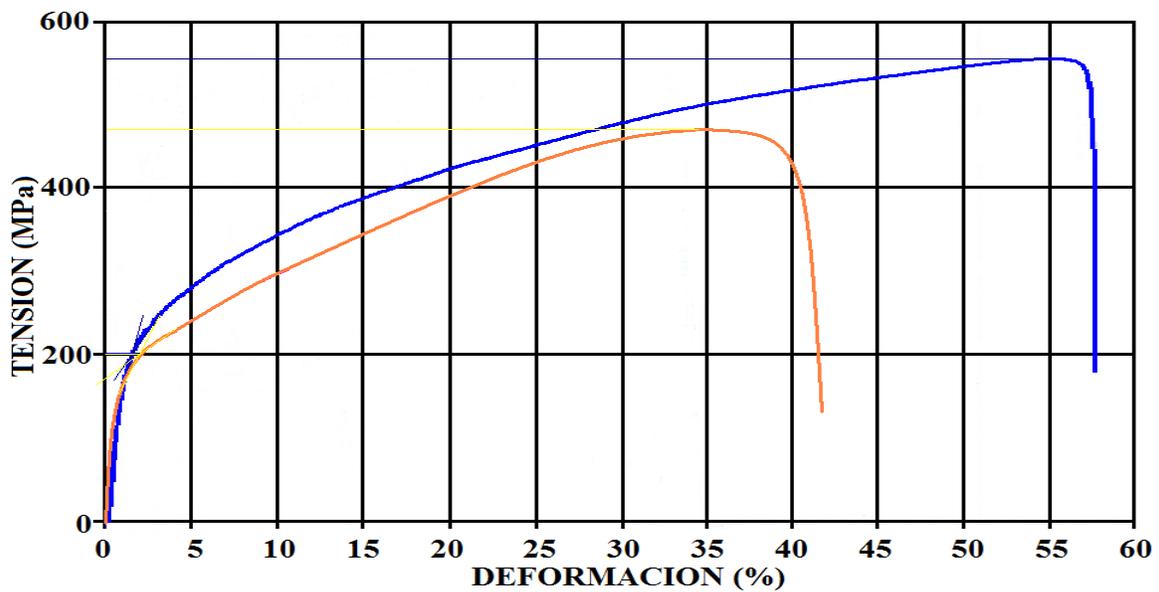


Fig. 49 Curva Tensión-Deformación para la muestra P-J5 a 25°C (línea azul) y a 450°C (línea anaranjada).

Las figura 49 muestra las curvas tensión-deformación para la muestra P-6 (tratada térmicamente) a temperatura ambiente (25°C) y a 450°C, como se puede observar, el límite de cadencia a 25°C es de 200.0 MPa, el cual se mantiene a 450°C. El valor de ultima resistencia a la tensión a 25°C es de 676.0 MPa mientras que a 450°C disminuye a 470.0 MPa. La elongación a 25°C es de 58.0% y a 450°C disminuye a 42.3%.

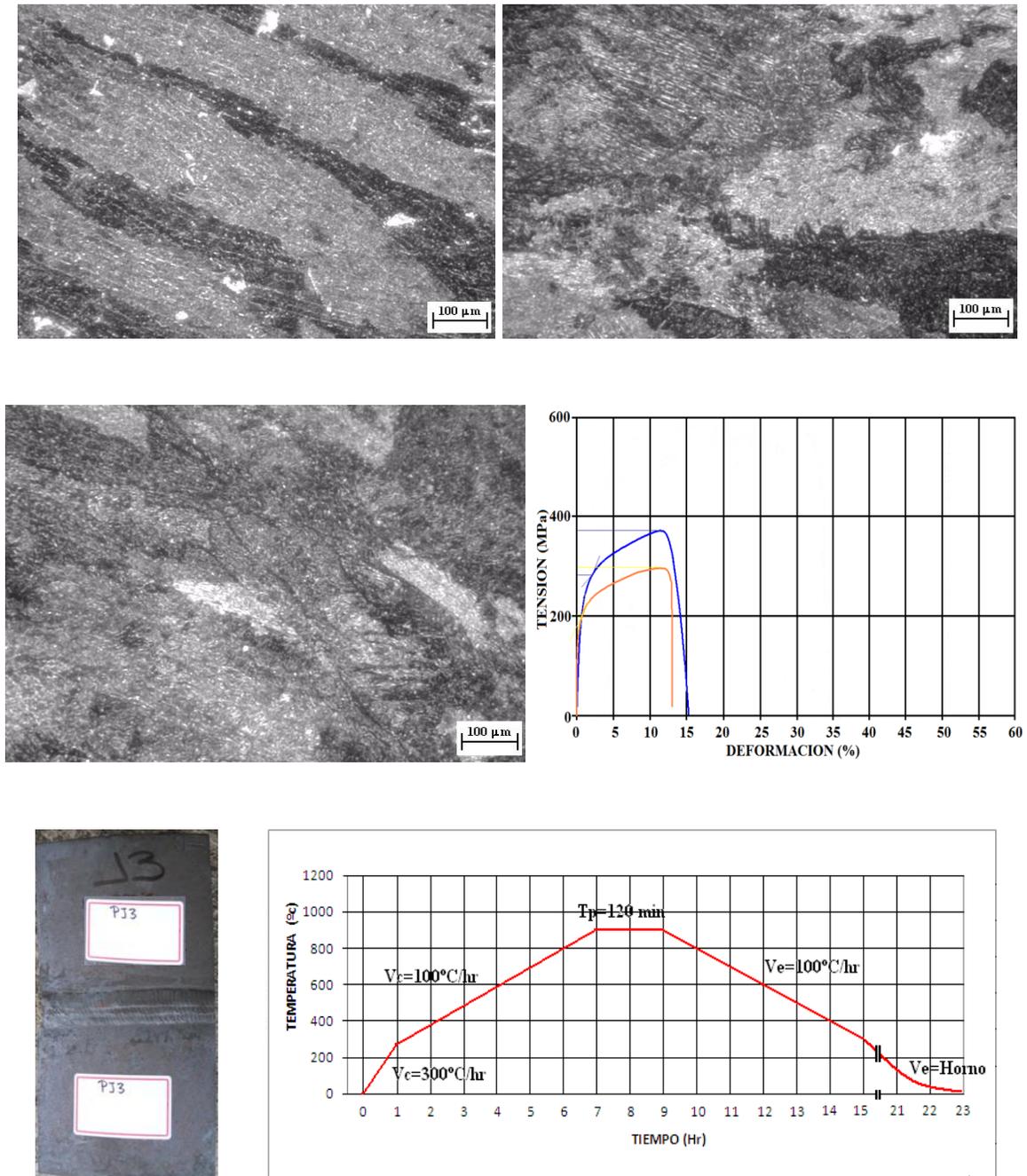


Fig. 50. Microestructura despues del el tratamiento tèrmico de relevado de esfuerzos llevado a cabo a 898.8°C.

“Estudio para evaluar y calificar el procedimiento de soldadura del acero SA-312 TP 347”

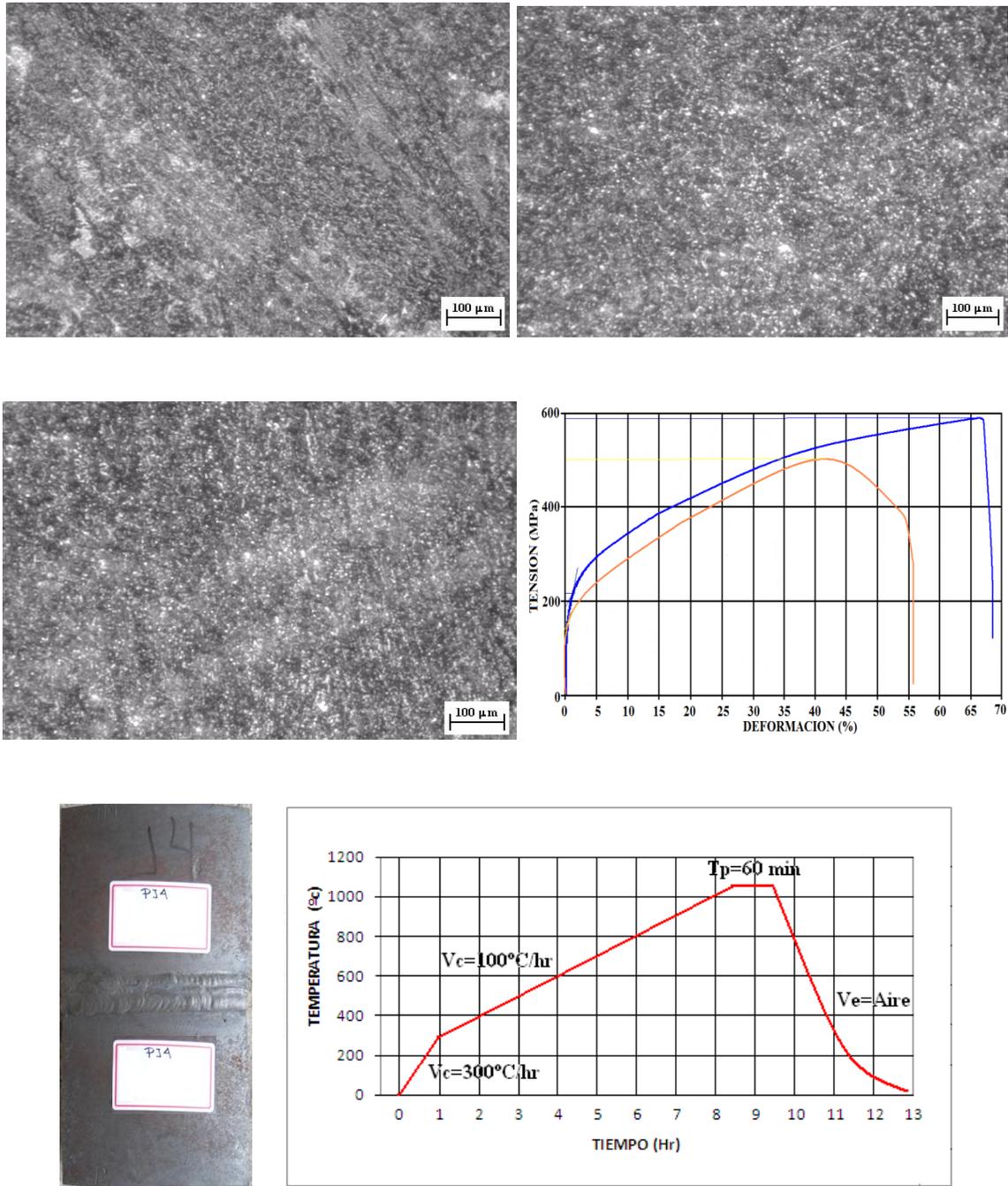


Fig. 51. Microestructura despues del el tratamiento tèrmico annealing llevado a cabo a 1065°C.

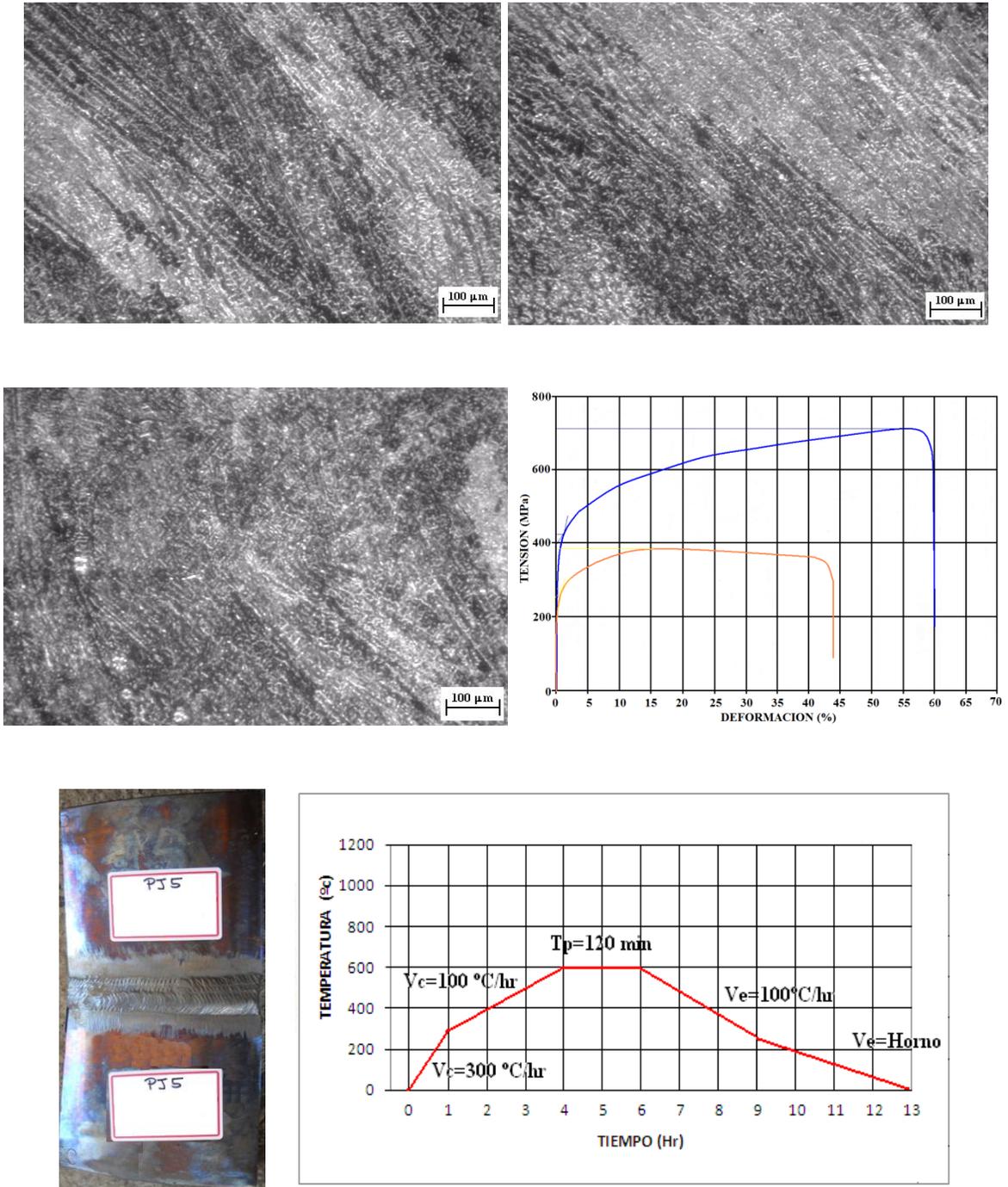


Fig. 52. Microestructura despues del el tratamiento tèrmico de relevado de esfuerzos llevado a cabo a 600°C .

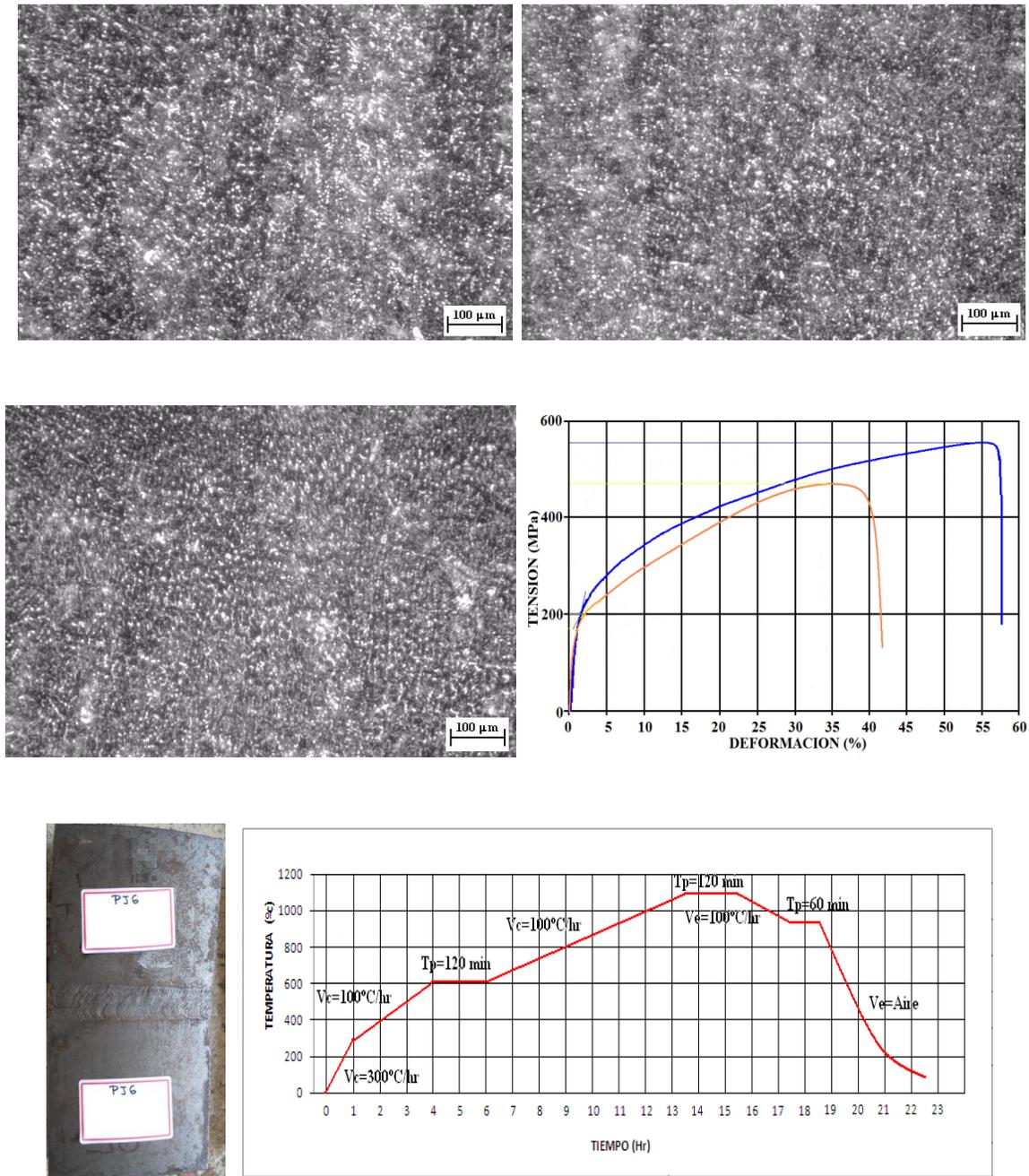


Fig. 53. Microestructura después del el tratamiento tèrmico de relevado de esfuerzos (600°C) disolucion de carburos (1150°C) y estabilidad de fase (950°C).

La figura 50 muestra la microestructura obtenida después de haber llevado a cabo un tratamiento tèrmico de relevado de esfuerzos a 898.8°C . Como se puede

observar, la microestructura muestra la presencia de granos elongados de austenita, con la presencia de compuestos intermetálicos del tipo FeCr (B2) en el límite de grano y carbonitruros alineados en la matriz. La presencia de este compuesto intermetálico continuo en el límite de grano causa una disminución en las propiedades mecánicas del cordón de soldadura.

La figura 51 muestra la microestructura obtenida después de haber llevado a cabo un tratamiento térmico de annealing a 898.8°C. Como se puede observar, la microestructura muestra la presencia de granos equiaxiados de austenita, con una menor presencia de compuestos intermetálicos del tipo FeCr (B2) en el límite de grano y carbonitruros en la matriz y límite de grano. Las propiedades mecánicas de la soldadura a temperatura ambiente están dentro de especificación, mientras que a alta temperatura (450°C), sus propiedades mecánicas están fuera de especificación.

Un efecto aun mayor que se observa durante este tratamiento termico, es que la presencia de burbujas generadas durante la solidificacion del cordon de soldadura causa que se generen grietas, las cuales corren en regiones del compuesto intermetalico.

La figura 52 muestra la microestructura obtenida después de haber llevado a cabo un tratamiento térmico de relevado de esfuerzos a 600°C. Como se puede observar, la microestructura muestra la presencia de granos elongados de austenita, con la presencia de compuestos intermetálicos del tipo FeCr (B2) continuos en el límite de grano y carbonitruros alineados en la matriz. La presencia de este compuesto intermetálico en el límite de grano causa una disminución en las propiedades mecánicas del cordón de soldadura a alta temperatura (450°C) y aunque el valor del esfuerzo de cedencia está dentro de norma, la última resistencia a la tensión no la cumple.

La figura 53 muestra la microestructura obtenida después de haber llevado a cabo un tratamiento térmico de relevado de esfuerzos (600°C), disolución de

precipitados (1150°C) y estabilidad de fase (950°C). Como se puede observar, la microestructura muestra la presencia de granos equiaxiados de austenita, con una menor presencia de compuestos intermetálicos del tipo FeCr (B2) en el límite de grano y carbonitruros en la matriz y límite de grano. Las propiedades mecánicas de la soldadura a temperatura ambiente con respecto al esfuerzo de cedencia están 15 puntos por debajo de especificación tanto a temperatura ambiente como a alta temperatura (450°C).

Análisis de beneficios en la productividad de la refinería

La refinería de Tula, Hidalgo, es la segunda mayor del país, y tiene una capacidad de producción de 86,000 barriles por día de combustóleo, lo que representa el 27 % del total de su producción.

La siguiente tabla muestra el desempeño del reactor DC 3102 en un periodo de un año.

Indicador de Producción del Reactor Catalítico DC 3102				
Producción barriles/día (combustóleo)	Total de reactores catalíticos	Producción por reactor	Días promedio de paro por fallas mecánicas en el reactor	Fallas en el año
86,000	5	17 200	10	5

Las fallas registradas se deben, de acuerdo al estudio realizado, al medio corrosivo al que se expone el equipo, el cual se ha eliminado gradualmente con la mejora en el procedimiento de soldadura del acero SA 312 TP 347, para el cual se vinculan los resultados de las evaluaciones de tratamientos térmicos, con las evaluaciones microestructurales sobre las muestras del reactor, enfocándose en el cordón de soldadura.

Del total de la productos refinados, la pérdida de producto es de 860,000 barriles en un año, por lo que a partir del análisis realizado, se elimina esta perdida de producto equivalente al 2.73% del total de producción anual.

El impacto que tiene la eliminación de las fallas mecánicas mocionadas en el estudio, además de plantear la solución del agrietamiento del reactor en cuestión, se toma como referencia para la prevención de este problema en los reactores que utilizan el mismo tipo de acero y el procedimiento de soldadura tradicional.

Este beneficio se materializa directamente en la productividad de la refinera, ya que evitar los paros de la producción, incrementa el volumen de ventas para el consumo nacional.

CONCLUSIONES

La mayor parte de los problemas con la soldadura de aceros inoxidable austeníticos están asociados con fracturas en caliente del mismo metal de soldadura. Esta tendencia a la fractura en caliente se ve agravada por su totalidad o en su mayor parte, por la solidificación austenítica. Para los aceros inoxidable austeníticos más comunes, la fractura en caliente se reduce al mínimo mediante el ajuste de la composición del metal de relleno. Para los aceros inoxidable austeníticos de alta aleación, donde se usa un material base níquel, es necesario metal de relleno, la solidificación austenítica es inevitable.

Cuando se emplea de acero inoxidable al cromo-níquel en equipos que requieren la máxima protección contra la precipitación de carburo obtenible a través del uso de un estabilizado grado, es esencial reconocer que hay una diferencia entre la capacidad estabilizadora de Columbio y Titanio.

La principal característica del acero 347 se ve limitada en parte por el ambiente y la fuerte presencia de medios corrosivos en relación a la temperatura de trabajo, es por ello que atendiendo a estas causas, los análisis de microscopía coadyuvaron en la adaptación del procedimiento de soldadura que integra las condiciones químicas necesarias para resistir el medio del Reactor.

En el estudio mostrado, las comparaciones entre las muestras arrojaron resultados que demuestran la importancia de las propiedades mecánicas iniciales del material y de las temperaturas a las cuales está expuesto debido a procesos complejos de refinación. Además, se han determinado las variables que influyen directamente en las fracturas del cordón de soldadura del reactor. Se hizo énfasis en que las características microestructurales del acero inoxidable en cuestión, son la base sobre la cual actúa el procedimiento de soldadura especificado. Es así como el diseño del experimento propuesto, nos permite ubicar los efectos de los tratamientos térmicos, procedimientos de soldadura sobre la composición final para poder determinar lo siguiente:

En todos los casos, las probetas muestran mayor valor de cedencia y de ultima resistencia a la tension a temperatura ambiente que a alta tempeartura 450 °C.

Existe una clara diferencia entre las probetas 1 y 2, las cuales no fueron sometidas a tratamientos termicos, sobre las demas que si fueron tratadas termicamente. Las primeras muestran valores considerablemente mayores en cuanto al limite de cedencia y el valor de ultima resistencia a la tension para ambos valores de temperatura.

Referencias

- 1) ASTM E837 - 08e1 *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*.
- 2) V Shankar, TPS Gill, SL Mannan, Sundaresan, Solidification Cracking in Austenitic Stainless Steels. Indira Gandhi Centre for Atomic, Kalpakkam 603 102, India. Sadhana Vol.28 , Parts 3 and 4,2003.
- 3) ASM Handbook Volume 4 *Heat Treating*, Arai Tohru, et al, 1991.
- 4) *Materials Science and Engineering—An Introduction*, Sixth Edition; William D. Callister. John Wiley and Sons, Inc. 2003.
- 5) *Introduction for Materials Science for Engineers*. Sixth edition, by James F Shackelford. 2006
- 6) *Steels: Heat Treatment and Processing Principles*, George Krauss. ASM Intl. 1990.
- 7) *ASM Metals Handbook Volume 1: Properties and selection: Irons, Steels and High Performance Alloys*.1990
- 8) *ASM Metals Handbook Volume 6. Welding, brazing and soldering*.
- 9) Cullity, B.D., *Elements of X ray diffraction*, third edition, Prentice Hall 2003.
- 10) *Manual de soldadura Soldexa-Oerlikon 7° ed*. 2002.
- 11) *Guidelines for Shielded Metal Arc Welding (SMAW)*, Miller Electric Mfg. _Co. 2013 USA.
- 12) www.ref.pemex.com Base de datos institucional.

ÍNDICE DE TABLAS E IMÀGENES

- Figura 1 Diagrama esquemático de la zona bajo estudio en donde se muestra la procedencia del cordón de soldadura de la bomba ebuladora en donde se detectó la presencia de grietas. La flecha amarilla indica la procedencia de la muestra bajo estudio.
- Figura 2 Grietas en acero inoxidable SA-312 TP 347 provenientes de regiones de la soldadura del Reactor DC-3102, de la bomba ebuladora obtenidas mediante la técnica de microscopía óptica de campo en mayo de 2010.
- Figura 3 Muestra bajo estudio.
- Figura 4 Grietas observadas en el cordón de soldadura del acero inoxidable SA-312 TP 347 provenientes de regiones del Reactor DC-3102, de la bomba ebuladora.
- Figura 5 Por ciento de gas disuelto en acero líquido y sólido.
- Figura 6 Construcción del Diagrama Schaeffler-Delong para aceros
inoxidables
- Figura 7 La familia de aceros inoxidables austeníticos.
- Figura 8 Proceso de soldadura GTAW
- Figura 9 Proceso de soldadura MAG
- Figura 10 Tobera con gas protector MIG/MAG
- Figura 11 Visión general del funcionamiento de un espectrómetro de masas.
- Figura 12 Obtención gráfica de resultados de la espectrometría
- Figura 13 Microscopio Electrónico de Barrido (MEB).
- Figura 14 Probetas después del proceso de soldadura WPS-02 para la probeta P-J1 y Condisa-WPS-03 para las probetas P-J2, P-J3, P-J4, P-J5 y P-J6.
- Figura 15 Corte de probeta para análisis de acumulación de esfuerzos y

caracterización de estructura y propiedades.

- Figura 16 Corte de muestras para su caracterización microestructural y mecánica.
- Figura 17 Etapa de velocidad de calentamiento (V_c), tiempo de permanencia (T_p) y velocidad de enfriamiento (V_e) para el tratamiento térmico de relevado de esfuerzos.
- Figura 18 Etapa de velocidad de calentamiento (V_c), tiempo de permanencia (T_p) y velocidad de enfriamiento (V_e) para el tratamiento térmico de annealing .
- Figura 19 Etapa de velocidad de calentamiento (V_c), tiempo de permanencia (T_p) y velocidad de enfriamiento (V_e) para el tratamiento térmico de relevado de esfuerzos.
- Figura 20 Etapa de velocidad de calentamiento (V_c), tiempo de permanencia (T_p) y velocidad de enfriamiento (V_e) para el tratamiento térmico de relevado de esfuerzos, solubilidad de carburos y estabilidad de fase.
- Figura 21 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J1 en el cordón de soldadura.
- Figura 22 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J1 en la zona afectada por el calor.
- Figura 23 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J1 en el material base.
- Figura 24 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J2 en el cordón de soldadura.
- Figura 25 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J2 en la zona afectada por el calor.
- Figura 26 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J2 en el material base.
- Figura 27 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J3 en el cordón de soldadura.

- Figura 28 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J3 en la zona afectada por el calor.
- Figura 29 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J3 en el material base.
- Figura 30 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J4 en el cordón de soldadura.
- Figura 31 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J4 en la zona afectada por el calor.
- Figura 32 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J4 en el material base.
- Figura 33 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J5 en el cordón de soldadura.
- Figura 34 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J5 en la zona afectada por el calor.
- Figura 35 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J5 en el material base.
- Figura 36 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J6 en el cordón de soldadura.
- Figura 37 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J6 en la zona afectada por el calor.
- Figura 38 Microfotografía de barrido en la condición de electrones retrodispersados de la muestra P-J6 en el material base.
- Figura 39 Estructuras dendríticas obtenidas en el cordón de soldadura (a) Procedimiento GTAW-SMAW y (b) Condisa-GTAW.
- Figura 40 Microestructuras de solidificación.
- Figura 41 Sección pseudobinaria del diagrama ternario Fe–Cr–Ni a 70 % en peso de Fe, mostrando los modos de solidificación: A – completamente austenítico, AF - austenítico–ferrítico, FA – ferrítico–austenítico y F – completamente ferrítico.

Figura 42	Representación esquemática de los modos de solidificación en soldaduras de aceros inoxidable austeníticos.
Figura 43	Proyecciones de liquidus y solidus del sistema Fe-Cr-Ni, mostrando los constituyentes de los diagramas binarios
Figura 44	Curva Tensión-Deformación para la muestra P-J1 a 25°C (línea azul) y a 450°C (línea anaranjada).
Figura 45	Curva Tensión-Deformación para la muestra P-J2 a 25°C (línea azul) y a 450°C (línea anaranjada).
Figura 46	Curva Tensión-Deformación para la muestra P-J3 a 25°C (línea azul) y a 450°C (línea anaranjada), tratada térmicamente.
Figura 47	Curva Tensión-Deformación para la muestra P-J4 a 25°C (línea azul) y a 450°C (línea anaranjada).
Figura 48	Curva Tensión-Deformación para la muestra P-J5 a 25°C (línea azul) y a 450°C (línea anaranjada).
Figura 49	Curva Tensión-Deformación para la muestra P-J6 a 25°C (línea azul) y a 450°C (línea anaranjada).
Figura 50	Microestructura después del el tratamiento térmico de relevado de esfuerzos llevado a cabo a 898.8°C.
Figura 51	Microestructura después del el tratamiento térmico annealing llevado a cabo a 1065°C.
Figura 52	Microestructura después del el tratamiento térmico de relevado de esfuerzos llevado a cabo a 600°C.
Figura 53	Microestructura después del el tratamiento térmico de relevado de esfuerzos (600°C) disolución de carburos (1150°C) y estabilidad de fase (950°C).
Tabla 1.	Composición química de la muestra bajo estudio (en % en peso).
Tabla 2.	Microanálisis en compuestos intermetálicos.

Tabla 2. Composición química esperada (en % en peso).

TABLA RESUMEN DE LAS EVALUACIONES EN TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Tabla resumen de las evaluaciones de tratamientos tèrmicos					
Tratamiento tèrmico	Velocidad de calentamiento a 200 °C (°C/hr)	Velocidad de calentamiento a 600 °C (°C)	Tiempo de permanencia (min)	Velocidad de enfriamiento a 600 °C (°C/hr)	Velocidad de enfriamiento a 200 (°C/hr)
Relevado de esfuerzos de Thèrmica Mexicana	300	100	120	100	Horno
Annealing	300	100	60	Aire	Aire
Relevado de esfuerzoz UNAM	300	100	120	100	Horno
Relevado de esfuerzos, solubilidad de precipitados y estabilidad de fase UNAM	300	100	120	100	aire

