



Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán

**Soldadura del acero inoxidable 304 con electrodo 308
con precalentamiento y post calentamiento a 350°C**

T E S I S

Que para obtener el título de

Ingeniero Mecánico Electricista

Presenta

Mariano David Ruiz López

Asesor

Dr. Héctor Enrique Curiel Reyna

Cuautitlán Izcalli, Estado de México, 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
ASUNTO: VOTO APROBATORIO
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES CUAUTITLÁN

M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales
de la FES Cuautitlán.
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis

Soldadura del acero inoxidable 304 con electrodo 308 con precalentamiento y post calentamiento a 350°C

Que presenta el pasante: MARIANO DAVID RUIZ LÓPEZ
Con número de cuenta: 31031000-0 para obtener el Título de la carrera: Ingeniería Mecánica Eléctrica

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 09 de octubre de 2019.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FORMA
PRESIDENTE	Dr. Héctor Enrique Curiel Reyna	
VOCAL	Dr. Andrés Herrera Vázquez	
SECRETARIO	Ing. José Armando González Ubina	
1er. SUPLENTE	Ing. Melisa Carmen Vargas Oliva	
2do. SUPLENTE	M. en I. Diego Sánchez García	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

LMCF/ntm*

Agradecimientos

Primeramente, quiero agradecer a Dios y a la vida, que me han permitido concluir esta meta, así a su vez me permitan seguir cosechando más logros junto a mi familia y amigos.

También, quiero agradecer profundamente a mis padres y mi hermana, quienes me han apoyado todo este tiempo y que, a su vez, siempre han buscado ante todo mi bienestar.

Agradezco, así mismo, a la Universidad por permitirme formar parte de su comunidad desde que entre al CCH Azcapotzalco hasta concluir mi preparación profesional en la FES Cuautitlán.

Un enorme agradecimiento al Dr. Curiel, quien me apoyo a partir del servicio social hasta la realización del presente trabajo, quien estimo como mentor y de que quien a su vez me ha ayudado a entender más de lo relativo a la ciencia de los materiales y de la industria.

Hago también una pequeña mención para agradecer al Ingeniero Noé y al CAT y V quienes me han brindado facilidades tanto en el servicio Social, así como en el desarrollo de la tesis siempre con una muy buena disposición.

A mis primos Gustavo, Raúl, Efrén, Axel, Daniel, Bianca y Monserrat, quienes también egresados de la FESC han compartido vivencias y experiencias conmigo no puedo más que agradecerles el tiempo y la confianza que me brindan.

A mis tíos y primos, gracias por siempre recibirme con los brazos abiertos, el tiempo que me han compartido y por sus buenos deseos, infinitas gracias.

A mis amigos; les agradezco el tiempo, por siempre apoyarme, sus buenos deseos y la amistad que me han brindado, las cuales no son palabras suficientes para agradecerles.

Dedicatorias

El presente trabajo va dedicado con mucho respeto a la memoria de mi primo, el Ingeniero Adalberto López Zarate (1988-2013) de personalidad alegre y amigable quien fungió como un hermano mayor para mí, mi hermana y mis primos; siendo un ideal al cual seguir, quien hizo nacer en el amor por la ingeniería y por el cual decidí emprender en esta rama; siendo su partida un muy duro golpe para mí y para mi familia.

De la misma manera, dedico este trabajo con mucho cariño a la memoria de mi prima, Karla Johana Ruiz López (2001-2018) de personalidad serena y dedicada quien para mí y para mi hermana fue una hermana menor, con quien pase muchos momentos felices y a quien también le nació un profundo interés por la ingeniería y, por el cual, alentábamos su elección; su partida me ha sido profundamente triste y dolorosa.

A la memoria de mis abuelos paternos, Albino Ruiz y Juana Ramírez, quienes no pudieron ver concluir esta etapa de mi vida pero que aún llevo presente su amor, sus buenos deseos y bendiciones, que sin saber leer y escribir me enseñaron cosas invaluable como el valor de una vida honrada; por lo cual, les dedico gratamente este trabajo.

Finalmente, a mis padres Mariano y Rocelia, no me alcanzan las palabras para agradecerles todo lo que han hecho todos estos años por mí y todo el amor que han dado, este más que ser un logro mío es de ustedes, les agradezco profundamente la paciencia que me tienen pues yo sé que soy muy testarudo y a veces muy difícil de tratar; a mi hermana Aline, aunque algunas veces tengamos diferencias sé que estás ahí para mí y sé que siempre te preocupas por mi bienestar y deseándome siempre lo mejor; por todo ello les dedico con todo mi amor el presente trabajo.

INDICE

RESUMEN.....	6
OBJETIVOS.....	7
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
JUSTIFICACION.....	9
INTRODUCCIÓN.....	10
CAPÍTULO 1.- MARCO TEÓRICO.....	11
1.1 ANTECEDENTES DE LOS ACEROS INOXIDABLES.....	11
1.2 GENERALIDADES.....	12
1.3 Clasificación de los aceros.....	13
1.4 Efectos de los componentes de los aceros inoxidables.....	16
1.5 Aceros inoxidables martensíticos.....	18
1.6 Aceros inoxidables ferrítico.....	19
1.7 Aceros inoxidables austeníticos:.....	20
1.8 Endurecimiento por precipitación.....	21
1.9 Aceros inoxidables dúplex.....	22
1.10 Propiedades físicas y mecánicas de los aceros inoxidables.....	22
1.11 Comportamiento tenso-deformación básica.....	23
1.12 Aceros Resistentes a Altas temperaturas.....	24
1.13 Acero inoxidable AISI 304.....	28
CAPITULO II. PROCESOS DE SOLDADURA.....	40
2.1 GENERALIDADES SOBRE SOLDADURA.....	40
2.3 Soldabilidad.....	54
2.5 Aspectos metalúrgicos de la soldadura.....	57
2.6 Fundamentos de la soldadura disímil.....	60
CAPITULO III. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	67
3.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	67
CONCLUSIONES.....	89
BIBLIOGRAFÍA.....	90

RESUMEN.

Simplificando el contenido, se trabaja para poder evaluar las fallas que se presentan en la unión del acero inoxidable AISI 304 y fundición gris por medio del proceso unión de materiales disimiles. Se revisará con el procedimiento de soldadura con precalentamiento y post calentamiento a 350 °C y a las probetas se le realizaran las pruebas de dureza y metalografía, en la zona afectada por el calor y zona de dilución o liga.

La investigación se enfocará principalmente a la unión de acero inoxidable 304 y el material de aporte 308, en las zonas antes mencionadas.

El capítulo I trata el tema de los aceros inoxidables, sus tipos y características. La soldabilidad de cada uno de ellos y los elementos de máquinas donde se emplean. Se hace énfasis en los aceros inoxidables austeníticos. Así mismo, se describe el acero inoxidable austenítico AISI 304 y las propiedades mecánicas, químicas y físicas del mismo, entre ellas la soldabilidad, se mencionan la efectividad de la unión del acero con la fundición.

El capítulo II describe diferentes procesos de soldadura, sus principios y fundamentos, así mismo, se explica de manera general los aspectos más importantes de la soldadura. También, se definirá el concepto de soldadura disímil a partir de sus fundamentos.

El capítulo III se realiza el diseño de la investigación con base en el análisis de problemas y defectos encontrados en procesos de soldadura realizados en elementos de acero inoxidable austenítico AISI 304, posteriormente se delimita el proceso experimental y la realización de los ensayos.

En el capítulo IV se exponen los resultados obtenidos de los ensayos realizados y se desarrolla su respectivo análisis.

OBJETIVOS.

Generales:

- 1.-Describir el comportamiento y propiedades de los aceros inoxidables, así como también, sus diversas clasificaciones y soldabilidad.
- 2.-Describir algunos de los procesos de soldadura y brevemente los fundamentos de la soldadura disímil y los factores metalúrgicos de la misma.

Específicos:

- 1.-Investigar el comportamiento y propiedades que presenta la unión del acero inoxidable AISI 304 en una soldadura disímil, con precalentamiento y post calentamiento.
- 2.-Investigar las propiedades de dureza y metalografía en la Zona Afectada por el Calor para determinar sus propiedades de sanidad del acero inoxidable AISI 304.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El proceso de soldadura de materiales disímiles del acero inoxidable AISI 304, implica una serie de consideraciones mecánicas y metalúrgicas que inciden en la calidad de los procesos industriales. La identificación de metal base, la selección adecuada del material de aporte y diseño del proceso, deben de realizarse escrupulosamente para evitar fisuraciones en las zonas de unión de la soldadura o en la zona afectada por el calor, la fisuración por el calor, fisuración por corrosión y fisuración en caliente.

Con la relación a la soldadura del acero AISI 304, la metodología propuesta para la resolución de cada caso en especial debe responder a los siguientes cuestionamientos: ¿Qué tipo de defectos se generan al aplicar un procedimiento de soldadura específico en elementos metálicos de acero inoxidable austenítico AISI 304? ¿Qué propiedades de soldabilidad se debe tener en cuenta con relación al acero AISI 304 y como es su comportamiento durante los procesos de soldadura? ¿Qué tipo de control debe realizarse para alcanzar la resistencia mínima requerida a las sollicitaciones mecánicas que se presenten durante el uso de los elementos aplicados?

JUSTIFICACION.

La siguiente investigación surge de las nuevas necesidades tecnológicas de realizar uniones y reparaciones por soldadura de elementos disímiles, para la conducción de productos en las industrias automotrices donde se emplea para conectar dos materiales juntos, generación de energía e industrias petroquímicas empleados en el proceso de producción petrolera. Consigo trae a su vez bastantes ventajas pues cada sección de los componentes soldados puede ser adecuada a una aplicación en específico. Así mismo, optimiza el diseño haciendo coincidir el material correcto con la propiedad o el comportamiento necesario. En algunos casos, proporciona una tolerancia al daño a toda la estructura.

Se pretende identificar las fallas que se presentan en los elementos de acero inoxidable austenítico AISI 304 soldados con una fundición. En los aceros inoxidables las elevadas temperaturas de proceso proporcionan la sensibilización o sensitización de las estructuras involucradas. Con el proyecto se preocupa que cualquier soldador, técnico o ingeniero identifique las propiedades de soldabilidad que posee y que seleccione utilizando las herramientas proporcionadas por la AWS Y ASM; junto con el manejo adecuado y las temperaturas de trabajo, que califique la calidad de la soldadura, ya sea visualmente o por medio de ensayos no destructivos, con el fin de disminuir las pérdidas de producto y los paros innecesarios.

INTRODUCCIÓN.

Los aceros inoxidable austeníticos como AISI 304 que contienen alto porcentaje de cromo y níquel, permiten tener una mayor resistencia a la corrosión, contribuyendo en diferentes procesos industriales como: la fabricación de productos para la industria del petróleo, así como en la industria del acero.

Los aceros inoxidable de la serie AISI 300 se consideran como las aleaciones más idóneas para el servicio bajo condiciones oxidación, sin embargo, hay que tomar en cuenta que son materiales que poseen diferentes tipos de estructuras y fases las cuales determinan las propiedades físicas y químicas en el servicio.

La presente investigación contiene una explicación general de los que son los aceros inoxidable resistentes a la oxidación y a la corrosión, su clasificación, propiedades físicas y químicas y las aplicaciones generales de los aceros serie AISI 300. Así mismo se menciona algunos procedimientos de aplicaciones de soldadura, los fundamentos de la soldadura.

El punto fundamental del tema consistió en determinar las propiedades de dureza y microscopía, en aquellas zonas afectadas por el calor.

La metodología se basó en realizar la unión a través de, un procedimiento de precalentamiento y post calentamiento a 350 °C, para posteriormente realizar probetas de ensayo y así efectuar su caracterización. Finalmente se deducen las conclusiones del desarrollo del producto, los resultados obtenidos en las pruebas realizadas y las necesidades cubiertas con su obtención.

CAPÍTULO 1.- MARCO TEÓRICO

1.1 ANTECEDENTES DE LOS ACEROS INOXIDABLES.

Existen muchas versiones diferentes sobre el origen del acero inoxidable. Una de ellas es que un comerciante francés se dio cuenta de que el tubo de un cañón permanecía brillante y limpio entre un montón de viejos y oxidados cañones de la primera guerra mundial. Aparentemente no había sido afectado por el tiempo y la intemperie. Las investigaciones revelaron que se le había agregado una cantidad excesiva de cromo al acero básico durante la fabricación de ese cañón en especial. Así es el acero inoxidable, cuna de las aleaciones más importantes.

Al principio se le llamó “Acero sin herrumbre”.

En la actualidad existen más de 30 tipos inoxidables.

Se considera que Guillet es el descubridor de las aleaciones Fe-Cr-Ni. Basado en la exploración de las propiedades mecánicas y metalúrgicas de estas aleaciones. Después de 1908 Giesen publicó un trabajo que le dio significado al entendimiento de las aleaciones Fe-Cr-Ni.

1.2 GENERALIDADES.

El acero es una aleación hierro-carbono en la cual el carbono aparece en un porcentaje variable de 0.05% a 1.7%. Además, está constituido por porcentajes de elementos como el manganeso, azufre, silicio y fósforo. Se prepara a partir del hierro colado del alto horno, a través de una operación de afinación que consiste en la descarburación del hierro fundido; es decir, de disminuir el contenido del carbón.

La propiedad de resistencia a la corrosión se debe a una película delgada, adherente, estable de óxido de cromo o de óxido de níquel que protege efectivamente el acero contra muchos medios corrosivos. La adición de níquel a un acero al cromo produce modificaciones en el material. Dicha película pasiva se vuelve a reconstruir cuando se la daña si el ambiente es suficientemente oxidante manteniendo una protección permanente del acero. La importancia de este tipo de aceros, además de sus características mecánicas y su amplio uso en diferentes ramas de la industria que se extiende desde aplicaciones de la vida cotidiana hasta industrias muy complejas (química, nuclear, petrolífera, etc.) se debe a su alta producción a nivel mundial aparejado al desarrollo industrial después de la segunda guerra mundial.

Los aceros inoxidable son aleaciones complejas en las que entran en juego múltiples elementos. Como se irá abordando, los principales elementos y su variación cambia la porción de las fases presentes, lo cual da lugar a aceros inoxidable austeníticos, ferrítico, martensíticos y dúplex. La figura 1 muestra una de las clasificaciones de los aceros inoxidable, los cuales se encuentran al final de dicha estructura como consecuencia de su alto grado de aleación.

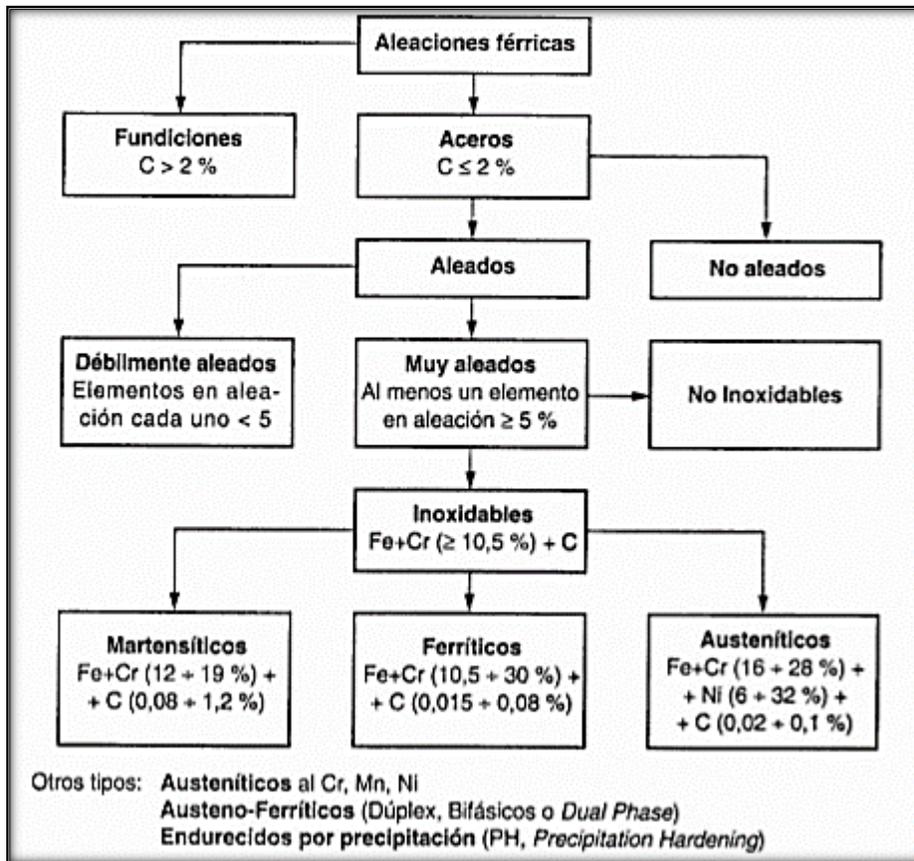


FIGURA 1: Clasificación de los aceros Inoxidables

1.3 Clasificación de los aceros.

- **ACEROS AL CARBON:** más del 90% de todos los aceros son aceros al carbón. Estos aceros contienen diversas cantidades de carbón y menos de 1.65% de manganeso, el 0.60% de silicio y el 0.60% de cobre. Entre los productos fabricados por acero al carbón figuran maquinas, carrocerías de automóvil, la mayor parte de estructuras de construcción de aceros, cascos de buques, bastidores y horquillas.
- **ACEROS ALEADOS.** Estos aceros contienen una proporción determinada de vanadio, molibdeno y otros elementos, además de cantidades mayores de manganeso, silicio y cobre que los aceros al carbón normales. Los aceros de aleación se pueden clasificar en:

Estructurales: Aquellos aceros que se emplean para diversas partes de máquinas, tales como engranes, ejes y palancas. Además, se utilizan en las estructuras de edificios, construcción de chasis de automóviles, puentes, barcos y semejantes. El contenido de la aleación varía desde 0.25% a un 6% de elementos diferentes al carbón.

Herramientas: aceros de alta calidad que se emplean en herramientas para cortar y modelar metales y no-metales. Por lo tanto, son materiales empleados para cortar y construir herramientas tales como taladros, fresas y machos para roscar (machuelos).

Especiales: aceros de aleación especial son los ACEROS INOXIDABLES y aquellos con un contenido de cromo generalmente al 12%. Estos de gran dureza y alta resistencia a las temperaturas y a la corrosión, se emplean en turbinas de vapor, engranes y ejes.

- **ACEROS DE BAJA ALEACION ALTA RESISTENCIA.** Esta familia es la más reciente de las cuatro grandes clases de acero. Los aceros de baja aleación

- **ACEROS INOXIDABLES.** El acero común se compone de fierro (Fe) con algunos otros elementos derivados de la fabricación del acero como el carbono (C), manganeso (Mn), silicio (Si), fósforo (P) y azufre (S). Un acero al carbono típico sin alear utilizado en la construcción tiene la siguiente composición química (en porcentaje del peso).

Composición Química (En % peso)					
C	Mn	Si	P	S	Fe
0.17	0.6	0.25	0.045	0.045	> 98

TABLA 1: Composición Química acero al carbón típico.

Si se añade un mínimo de 11% de cromo a este acero se obtiene un “acero inoxidable”

Composición Química (En % peso)						
C	Mn	Si	P	S	Cr	Fe
0.17	0.6	0.25	0.045	0.045	11.0	≤ 87

TABLA 2: Composición Química acero inoxidable típico.

El hierro sigue siendo el elemento dominante, pero el añadido de cromo requiere también algunos cambios menores en el contenido de manganeso y silicio para facilitar la fabricación del acero, así como de fósforo y azufre. Estos dos elementos son impurezas y tienen un efecto negativo con algunas de las propiedades del acero, como la resistencia a la corrosión y a la soldabilidad. Un acero con un 11% de cromo representa la forma más simple de un acero inoxidable. Su resistencia a la corrosión es suficiente para resistir un entorno acuoso poco severo.

El añadir cromo a un acero tiene como resultado la formación de una capa delgada, estanca, adherente y dúctil de óxido de cromo sobre la superficie del acero, siempre que se exponga al aire u a otro entorno oxidante. Puesto que esta capa confiere pasividad al acero, lo que significa que este no se corroe de forma activa, se le denomina también capa pasiva.

Los aceros inoxidables pueden ser clasificados en 5 familias. Cuatro de estas familias están basadas en las características de la estructura cristalográfica (microestructura).

Estas familias son martensíticos, ferríticos, austeníticos, endurecimientos por precipitación y dúplex (austenita más ferrita).

1.4 Efectos de los componentes de los aceros inoxidables.

CROMO

Es el único elemento imprescindible para la formación de la película pasivada que proporciona resistencia a la corrosión del acero. Otros elementos, además, pueden activar el cromo para la formación o el mantenimiento de dicha película, pero ellos mismos no pueden crear las propiedades de los aceros inoxidables en este sentido. La película puede formarse ya cuando el contenido de cromo es de 10,5%, pero sobre todo dependiendo de la composición del acero, esta película es muy susceptible de romperse en medios medianamente agresivos. Incrementando el contenido de cromo hasta un 17-20% como en el caso de los aceros inoxidables austeníticos, o al 26-29% como los ferríticos más recientes, se aumenta enormemente la estabilidad de la película pasivada. Sin embargo, un contenido de cromo excesivamente elevado puede afectar las propiedades mecánicas, la soldabilidad o las posibles aplicaciones de aceros que han de estar expuestos a elevadas temperaturas.

Así resulta que, a menudo, es más eficiente aumentar la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables incrementando su contenido en otros elementos sin elevar su contenido de cromo.

NÍQUEL

En suficientes cantidades es estabilizador de la estructura austenítica. Es un elemento muy efectivo en la reformación de la capa pasivada una vez que ha sido destruida, especialmente en medios reductores. El níquel es particularmente útil para aumentar la resistencia a la corrosión en medios ácidos minerales. Cuando su contenido es superior a 8-10% decrece la resistencia a la fisuración por corrosión bajo tensión (SCC), que no vuelve a aumentar hasta que la cantidad de níquel se acerca al 30%. En los nuevos aceros inoxidables ferríticos, en los que la adición de níquel es menor que la requerida para desestabilizar la fase ferrítica, produce efectos substanciales, como aumento de la resistencia mecánica, tenacidad y

resistencia en ácidos reductores, aunque el acero inoxidable queda con mayor susceptibilidad a la corrosión SCC en soluciones concentradas de cloruros.

MANGANESO

En moderadas cantidades y en asociación con el níquel proporciona muchas de las cualidades de este último. Sin embargo, no es práctico substituir totalmente al níquel por el manganeso.

Los aceros con altos contenidos de manganeso tienen algunas propiedades no usuales y útiles. El manganeso interactúa con el azufre de los aceros inoxidables formando sulfuro de manganeso que puede tener efectos importantes respecto a la resistencia a la corrosión, especialmente por picaduras.

MOLIBENO

En combinación con el cromo es muy efectivo en términos de estabilizar la película pasivada en presencia de cloruros. Es especialmente efectivo para evitar la iniciación de fisuras y picadura por corrosión.

CARBONO

Es útil ya que aumenta la capacidad de endurecimiento mediante tratamiento térmico al resultar un acero susceptible de transformación martensítica. En general, el carbono disminuye la resistencia a la corrosión del acero inoxidable al formarse carburos de cromo en los límites de grano, de características catódicas frente al resto del acero.

NITROGENO

Beneficia a los aceros inoxidables austeníticos en cuanto a su resistencia a corrosión por picadura, retardando la formación de la fase σ -cromo-molibdeno. Su presencia es esencial en los nuevos tipos de aceros inoxidables dúplex ya que incrementa el contenido de austenita y disminuye la segregación de cromo y molibdeno, aumentando así la resistencia a la corrosión de la fase austenítica. Sin

embargo, el nitrógeno disminuye enormemente las propiedades mecánicas de los aceros inoxidable ferríticos y debe ser tratado como el carbono en este tipo de aceros, añadiendo elementos estabilizadores cuando su contenido comienza a ser elevado.

1.5 Aceros inoxidables martensíticos.

Estos aceros tienen cierta similitud con los aceros al carbono que han sido austenitizados, endurecidos por temple y luego revenidos para incrementar la ductilidad y tenacidad. Estas aleaciones son magnéticas y su estructura tratada térmicamente es tetragonal centrada en el cuerpo (BCT). En su condición de recocido tienen una resistencia de fluencia del orden de 275 MPa y generalmente en esta condición pueden ser maquinadas, conformadas y trabajadas en frío.

La resistencia obtenida por tratamiento térmico depende del contenido de carbono de la aleación, el incremento del carbono aumenta la resistencia y dureza, pero en detrimento de la ductilidad y tenacidad.

Los aceros martensíticos contienen de 11.5 a 18% de cromo y de 0.1 a 2% de carbono y templados pueden adquirir gran dureza, raramente contiene otros elementos de aleación salvo a veces silicio para aceros que debe resistir oxidación en caliente o níquel para conservar su temple cuando el contenido de cromo es alto.



FIGURA 2: Acero inoxidable (martensítico) tipo 440C endurecido por austenitizado a 1010°C y enfriado por aire. La estructura consiste en carburos en una matriz martensita.

1.6 Aceros inoxidables ferrítico.

Se trata de aleaciones binarias hierro-cromo que con su alto contenido de cromo poseen como características principales la buena resistencia a la corrosión que variará según la cantidad de Cr que contiene.

Aparte de poseer un contenido alto en cromo (12 al 30%), también tiene un contenido en carbono de 0.12% .su estructura cristalina es cubica centrada en el cuerpo (BCC) por lo que sus propiedades mecánicas son buenas.

Aplicaciones, gracias a que son fácilmente conformables en frio son utilizados en recipientes y herramientas para la industria química y alimentación. Como factores negativos encontramos una baja solubilidad y no pueden ser tratados térmicamente (temple). Los aceros ferríticos no tiene alta resistencia mecánica, su límite de fluencia en la condición de recocido se encuentra en el rango de 210 a 350 MPa. Su pobre tenacidad y susceptibilidad a la sensibilización constituye una limitación para su fabricación y el tamaño de sección que se puede usar. Su principal ventaja es su resistencia a la corrosión bajo tensiones (SCC) en presencia de cloruros, resistencia a la corrosión atmosférica, y resistencia a la oxidación relativa a un bajo costo.



FIGURA 3: Tira de acero inoxidable (ferrítico) tipo 430 recocido a 788°C. La estructura consiste en una matriz de ferrita con grano equiaxial y partículas de carburo dispersas.

1.7 Aceros inoxidables austeníticos:

Estos constituyen la más grande familia de inoxidables en términos de usos y cantidad de aleaciones disponibles. Al igual que los ferríticos no pueden ser endurecibles por tratamiento térmico, las aleaciones austeníticas no magnéticas. Los aceros inoxidables austeníticos son esencialmente aleaciones ternarias, por su contenido de Fe Cr Ni. El cromo se encuentra entre 16 y 25%, níquel 7 a 20% en peso. Se denominan austeníticos debido a su estructura FCC, de hierro, estabilizada por los altos contenidos de níquel en la aleación.

Aunque el níquel es el principal elemento utilizado para estabilizar la austenita, el carbono y el nitrógeno también contribuye porque son fácilmente solubles en austenita. Un amplio rango de resistencia a la corrosión se puede alcanzar balanceando los elementos estabilizadores de la ferrita y los estabilizadores de la austenita.

Los aceros austeníticos pueden ser divididos en 2 categorías: aleaciones al cromo-níquel tales como los tipos AISI 304-S30400 Y 316-S31600 y aleaciones al cromo, manganeso y nitrógeno tales como los tipos AISI 201-S20100 Y 18-2Mn-S24100. Este último grupo generalmente contiene menos níquel y mantiene la estructura austenítica con altos niveles de nitrógeno. El manganeso es necesario en los aceros de bajo níquel para incrementar la solubilidad del nitrógeno. El manganeso es necesario en los aceros de bajo níquel para incrementar la solubilidad del nitrógeno incrementa la resistencia de fluencia.

El grado de endurecimiento por trabajo en frío depende de los elementos de aleación, particularmente los estabilizadores de la austenita. Debido a que el mecanismo de endurecimiento esté relacionado con una transformación de la austenita, la estabilidad de ésta condiciona dicho endurecimiento.

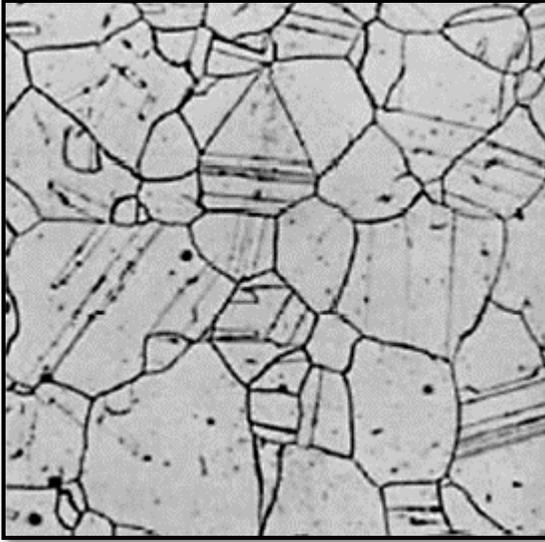


FIGURA 4: Acero inoxidable (austenítico) tipo 304 recocido 5 minutos a 1065°C y enfriado por aire. La estructura consiste en granos de austenita equiaxial.

1.8 Endurecimiento por precipitación.

Las aleaciones que componen esta clase son CB-7Cu y CD-4MCu. El primer tipo de aleación posee un bajo contenido de carbón, con una estructura martensítica que contiene cantidades menores de austenita retenida.

La resistencia a la corrosión del CB-7Cu se encuentra entre los del tipo CA y las aleaciones Cf no endurecibles, y se requiere su uso en donde las propiedades a alta resistencia y corrosión sean mejoradas.

Las fundiciones CB-7Cu, se pueden maquinar fácilmente y si el endurecimiento continúa con una baja temperatura, el tratamiento es a 900°C y un tratamiento posterior a 482°C. Para esta propiedad la clase CB-7Cu tiene una amplia aplicación para resistir corrosión en fundiciones maquinadas para la industria procesadora de alimentos.

El tipo CD-4MCU es una aleación de dos fases con una estructura austenita–ferrita, la cual, debida a estos contenidos altos de cromo y bajos de carbono, no se desarrolla u obtiene martensita con tratamiento térmico.

1.9 Aceros inoxidables dúplex

Son aceros al cromo–níquel–molibdeno cuya composición está balanceada para obtener una mezcla de austenita y ferrita. Esta estructura dúplex resulta en una mejor resistencia a la corrosión bajo tensión y picadura, comparado con los austeníticos y una mejor ductilidad y tenacidad comparados con los ferríticos. Son capaces de alcanzar una resistencia de fluencia de 550 a 690 MPa en su condición de recocido, lo cual es el doble del nivel de resistencia de cualquiera de las fases por si sola.

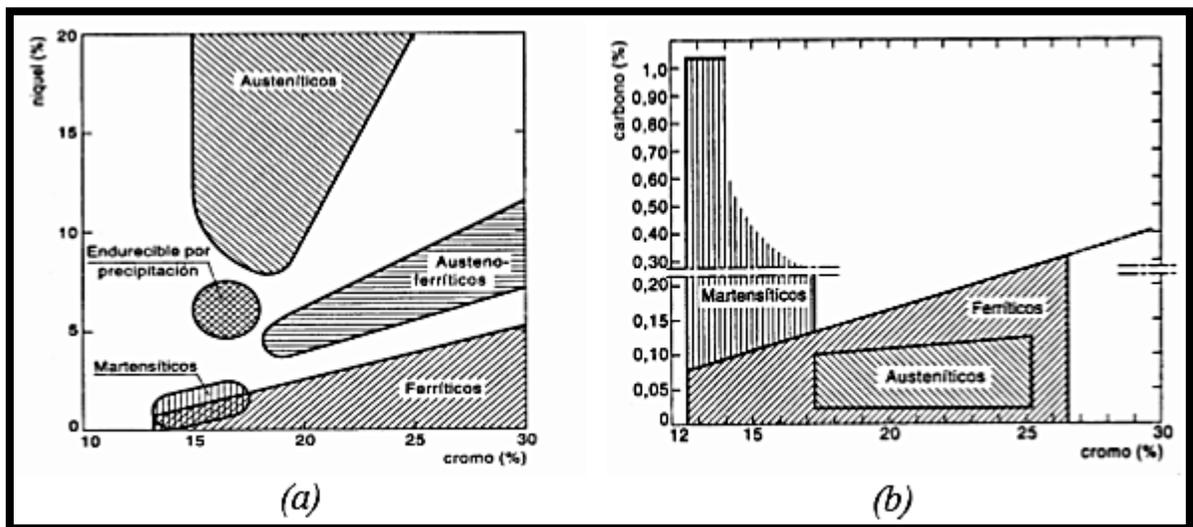


FIGURA 5: Tipos de familias de aceros inoxidables en función del contenido de (a) cromo y níquel (b) cromo y carbono.

1.10 Propiedades físicas y mecánicas de los aceros inoxidables.

Existen muchos tipos de acero inoxidable y no todos son adecuados para aplicaciones estructurales, particularmente cuando se llevan a cabo operaciones de soldadura. Hay cinco grupos básicos de acero inoxidable clasificados de acuerdo con su estructura metalúrgica: austeníticos, ferríticos, martensíticos, dúplex y endurecimiento por precipitación. Los aceros inoxidables que contienen solamente cromo, se llaman "ferríticos", ya que tienen una estructura metalográfica formada básicamente por ferrita. Son magnéticos, y se distinguen porque son atraídos por un imán. Estos aceros, con elevados porcentajes de carbono, son templables y, por tanto, pueden endurecerse por tratamiento térmico pasando a llamarse aceros

inoxidables "martensíticos", por tener martensita en su estructura metalográfica. Los aceros inoxidables que contienen más de un 7% de níquel, se llaman "austeníticos", ya que tienen una estructura metalográfica en estado recocido, formada básicamente por austenita. No son magnéticos en estado recocido, y por tanto no son atraídos por un imán. Estos aceros austeníticos se pueden endurecer por deformación, pasando su estructura metalográfica a contener "martensita". En esta situación se convierten en parcialmente magnéticos

1.11 Comportamiento tenso-deformación básica.

El comportamiento tensión-deformación del acero inoxidable se refiere del comportamiento del acero al carbón en varios aspectos. La diferencia más importante reside en la forma de la curva tensión-deformación. Mientras el acero al carbón exhibe un comportamiento elástico lineal hasta su límite elástico y una zona plana antes del endurecimiento por deformación, el acero inoxidable presenta una curva tensión-deformación con formas más redondeadas sin límite elástico definido por ello, el "límite elástico" del acero inoxidable se expresa, en general, en términos de una resistencia de prueba definida para un determinado valor de deformación remanente (convencionalmente la deformación del 0,2%)

En cualquier caso, debe señalarse que el acero inoxidable puede absorber impactos considerables sin que se sobrevenga la fractura, gracias a su excelente ductilidad (especialmente los grados austeníticos) y a sus características de endurecimiento por deformación.

1.12 Aceros Resistentes a Altas temperaturas.

Las aleaciones resistentes a altas temperaturas soportan los ataques corrosivos de gases calientes por que forman capas protectoras adherentes que disminuyen la velocidad de corrosión con el tiempo. La capa protectora aumenta con el incremento de cromo o níquel, dependiendo de los constituyentes de la atmosfera a la cual es expuesta la aleación. La estabilidad estructural es otra propiedad esencial para la vida prolongada de las aleaciones usadas a alta temperatura. En los cambios de fase (de ferrita a austenita y viceversa) se evita la distorsión que ocurre en la aleación por medio de los constituyentes de reforzamiento, tales como carburos nucleados no precipitados.

Las aleaciones resistentes al calor se pueden clasificar en 3 clases, dependiendo del contenido de los aleantes.

Clase 1. Grados fierro–cromo. - Contiene de 8% a 30% de cromo y poco o nada de níquel. Tienen baja resistencia mecánica a elevadas temperaturas, pero excelente resistencia a la oxidación, son usadas bajo condiciones oxidantes, con calentamiento uniforme y bajas cargas estáticas.

Los tipos HA, HC Y HD, están incluidos en este grupo. El tipo HA es recomendado para uso solamente a temperaturas por arriba de 649°C. El contenido de molibdeno de la aleación mejora la resistencia en el rango de temperatura 538 a 649 °C y las fundiciones de este grado son usadas extensamente en la industria del petróleo. Las aleaciones HC y HD son usadas en aplicaciones donde toleran cargas medias por arriba de 649 °C y, donde solamente cargas ligeras son aplicadas, arriba de 1038°C. El tipo HD tienen mayor resistencia que el tipo HC a temperatura elevada porque tiene mayor contenido de níquel. El HC y HD son especialmente útiles en atmosferas que contiene alto contenido de azufre y en aplicaciones donde no requieren aleaciones con alto contenido de carbono. Los usos en atmosferas con alto contenido de azufre no requieren alta resistencia ante la temperatura. Las aleaciones HC Y HD formaran fase sigma si se mantiene por largos periodos en el rango de temperaturas de 704 a 816°C.

Clase 2. Grados fierro-cromo-níquel. Contienen más de 19% de cromo y más de 9% de níquel, con el contenido de cromo mayor que el de níquel. Son usadas bajo condiciones oxidantes para resistir cambios moderados de temperaturas. Esta clase de aleaciones incluye las HE, HF, HK Y HL, las cuales son parcial o totalmente austeníticas, teniendo mayor resistencia a altas temperaturas que las aleaciones de la clase 1. Son usadas en atmosferas reductoras u oxidantes que contienen cantidades moderadas de azufre. El tipo HE es para servicios por arriba de 1093°C tiene excelente resistencia a la corrosión a altas temperaturas, tiene bajo contenido de níquel, es útil en medios con muy alto contenido de azufre.

El tipo HF es similar en composición al CF, con la diferencia que el contenido de carbón es más alto, las fundiciones de estas aleaciones operan entre 649 a 871°C.

El tipo HH presenta alta resistencia mecánica y resistencia a la oxidación a temperaturas arriba de 1093°C. Dependiendo del balance de la composición, la aleación puede ser parcialmente ferrítica o totalmente austenítica. El tipo austenítico es seleccionado para operaciones por debajo de 871°C; para servicio por encima de 871°C cualquiera de las dos composiciones servirá; el ferrítico para ductilidad a mayor temperatura y el austenítico para mayor resistencia al calor.

El tipo HI es más resistente a la oxidación que el tipo HH y puede ser usado arriba de 1176°C. Similar al HH en propiedades mecánicas, el grado HI ha sido usado principalmente para retortas vaciadas operando arriba de 1149°C en la producción de magnesio. El tipo HK es también similar a una aleación completamente austenítica HH; tiene alta resistencia a la oxidación y es una de las aleaciones resistentes a la temperatura más eficaces a temperaturas arriba de 1038°C. Puede ser usada en aplicaciones estructurales arriba de 1149°C, pero no es recomendada para atmosferas en presencia de alto contenido de azufre o donde existen severos choques térmicos. La variedad HK-40 (.35-.45% de carbón) es un estándar para tubería fundida enfriada por centrifugación que se usa en procesos petroquímicos y de refinación de petróleo. El tipo HL es semejante al tipo HK, pero tiene mayor contenido de carbón. La composición de estas aleaciones es de las

más resistentes a la corrosión en atmosferas que contienen alto contenido de azufre a temperaturas de 982°C o superiores; es usada en donde se requiere mayor resistencia que la obtenida en el grado HE o que las aleaciones de la clase 1. sus usos típicos son para instalaciones de equipo de disociación de gas, tubos radiantes y tiros de chimeneas.

Clase 3. Grados fierro-níquel-cromo. Contiene más de 10% de cromo y 23% de níquel, con el contenido de níquel mayor que el cromo. Son usadas tanto en condiciones de reducción como de oxidación para resistir severos gradientes de temperaturas.

Las aleaciones HN, HP, HY, HU, HW y HX. Estas aleaciones contienen níquel como elemento aleante predominante o como metal base y tienen una estructura austenítica estable que no es sensible a variaciones en composición como los grados de la clase 2 de cromo. Este grupo de alto níquel constituye el 40% de la producción total de fundiciones resistentes al calor. Pueden usarse a 1149°C; tienen buena resistencia en caliente, no se carbonizan fácilmente y tienen buen servicio donde hay calentamiento y enfriamientos rápidos. Por su alto contenido de níquel, no se recomienda su uso en atmosferas de alto contenido de azufre.

En las especificaciones para las aleaciones fundidas resistentes al calor sus propiedades mecánicas mínimas a temperaturas ambiente son valores que tiene poca importancia. Puede ser de interés si las fundiciones son sometidas a esfuerzos elevados cuando están a temperaturas ambiente.

No. AISI	Composición Química (%)						Resistencia a la tensión Mín.(MPa)	Resistencia a la fluencia Mín.(MPa)
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo		
Aceros Inoxidables austeníticos al cromo-níquel-manganeso								
201	0.15	5.5-7.5	1.0	16.0-18.0	3.5-5.5		515	260
202	0.15	7.5-10.0	1.0	17.0-19.0	4.0-6.0		515	205
Aceros Inoxidables austeníticos al cromo-níquel								
302	0.15	2.0	1.0	17.0-19.0	8.0-10.0		515	205
304	0.08	2.0	1.0	18.0-20.0	8.0-12.0		515	205
309	0.2	2.0	1.0	22.0-24.0	12.0-15.0		515	205
316	0.08	2.0	1.0	16.0-18.0	16.0-18.0	2.0-3.0	515	205
Aceros Inoxidables martensíticos al cromo								
416	0.15	1.25	1.0	12.0-14.0			450	205
431	0.20	1.0	1.0	15.0-14.0			450	205
Aceros Inoxidables ferríticos al cromo								
405	0.08	1.0	1.0	11.0-14.5			415	170
430	0.12	1.0	1.0	14.0-18.00			450	205

TABLA 3: Composición Química de aceros inoxidables.

1.13 Acero inoxidable AISI 304.

Acero inoxidable austenítico Cr-Ni con mejor resistencia que el tipo 302. Posee alta ductilidad, excelente regulación del temple por recalentamiento y propiedades de repujado en torno; es esencialmente no magnético sin embargo al trabajarse en frío se vuelve ligeramente magnético. Por su bajo contenido de carbono tiene menores precipitaciones de carburos en la zona afectada por el calor cuando se está soldando y reducida susceptibilidad a la corrosión intergranular.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0.08	1.00	2.00	0.045	0.030	18.00	8.00
Máy.	Máy.	Máy.	Máy.	Máy.	20.00	10.50

Tabla 4: Composición química (%).

Cuando se mantienen a temperaturas comprendidas entre los 450 °C y 900 °C se provoca una precipitación de carburos que lo hacen susceptible a la corrosión intergranular, estos carburos precipitados podemos disolverlos nuevamente con un temple austenítico (hipertemple).

Este problema aparece en las soldaduras, precipitándose los carburos en las zonas cercanas al cordón donde la temperatura está comprendida entre 450°C a 900 °C. Por ello, su empleo queda limitado a piezas que posteriormente pueden recibir un temple austenítico (hipertemple).

Es posible la soldadura con todos los procedimientos, pueden realizarse bajo la llama oxiacetilénica y por resistencia. Para espesores pequeños puede emplearse la soldadura con arco sin material de aporte y bajo atmosfera de argón puro, para espesores grandes, el mismo procedimiento con alambre de aporte o soldadura con electrodo revestido. Las soldaduras deben ser decapadas y pasivadas para evitar focos de corrosión.

Mantienen buena resiliencia a temperaturas bajo cero y la estructura de este acero es austenítica a todas temperaturas. Es diamagnético (no lo atrae los imanes).

Transformación en caliente

De 1175 °C a 850 °C con enfriamiento al aire. La temperatura influye en el grado de deformación. Para grandes reducciones puede elevarse la temperatura inicial hasta 1250 °C. por su baja conductividad térmica es necesario darle mayores permanencias que en el caso de los aceros comunes.

Tratamientos térmicos

Con un temple austenítico (hipertemple) entre 1030 °C y 1100 °C se disolverán los carburos precipitados. El enfriamiento se hará en agua. Cuando las piezas a tratar sean de acero moldeado se conviene aumentar la temperatura unos 50 °C, la temperatura del temple austenítico. Con este tratamiento la estructura estará formada básicamente por austenita, aunque pueden aparecer pequeñas cantidades de ferrita. Esto dependerá de la composición química, de la temperatura del tratamiento y del enfriamiento.

Propiedades físicas

Tratamiento	Rm N/mm^2 (Kgf/mm ²)	Rp del 0.2% mín. N/mm^2 (Kgf/mm ²)	Rp del 1% mín. N/mm^2 (Kgf/mm ²)	A en %, mín.			ρ (KU) Mín. J (Kgfmm)	Dureza HB
				barras	planos			
				$5 \leq d \leq 160$	$0.5 \leq d \leq 3$	$3 \leq e \leq 30$		
Hipertemple	490 – 685 (50 -70)	195 (20)	235 (24)	40	38	40	118 (12)	192 Máx.

Tabla 5: Propiedades mecánicas a temperatura ambiente.

Perfil	Resistencia a la Tracción (Rm) N/mm^2 (Kgf/mm ²)	Limite elástico Del 0.2% (Rp) N/mm^2 (Kgf/mm ²)	Alargamiento (L=50mm) %	Estricción %	Dureza
Chapa y fleje	590 (60)	245 (25)	50	-	80 HRb
Planchas	590 (60)	205 (21)	60	70	150 HB
Barras	590 (60)	205 (21)	60	70	150 HB

Tabla 6: Propiedades de tracción a temperatura ambiente de diferentes perfiles (recocidos).

Ensayo Izod <i>Kgf/cm²</i>	Ensayo Charpy (entalla En ojo de cerradura) <i>Kgf/cm²</i>	Ensayo Charpy (entalla en V) <i>Kgf/cm²</i>
17 - 21	22, 27.19	13.17 mín.

Tabla 7: Resiliencias a temperatura ambiente para materiales recocidos.

Límite de fatiga típico de chapa recocida = 245 N/mm^2 (25 Kgf/mm^2)

a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
98	102 - 248	250	210 - 317	553	521 - 607	62.3	52 - 68	71.2	53.5 – 78.5	144	116 - 159

Tabla8: Propiedades de tracción transversal y dureza en un punto intermedio entre el centro y la superficie de varias planchas, espesor: 100 mm o más.

- a) Numero de planchas comprobadas.
- b) Intervalo de espesores, en mm.
- c) Media del límite elástico del 0.2% en N/mm^2 .
- d) Intervalo del límite elástico del 0.2% en N/mm^2 .
- e) Media de la resistencia a la tracción, en N/mm^2 .
- f) Intervalo resistencia a la tracción, en N/mm^2 .
- g) Media de alargamiento (L=50 mm), en %.
- h) Intervalo de alargamiento (L=50 mm), en %.
- i) Media de estricción, en %.
- j) Intervalo de estricción, en %.
- k) Media de la dureza Brinell.
- l) Intervalo de la dureza Brinell.

Temperatura °C	Tiempo, horas	Estado	Resistencia a la Tracción (Rm) <i>N/mm²(Kgf/mm²)</i>	Limite elástico Del 0.2 % (Rp) <i>N/mm²(Kgf/mm²)</i>	Alargamiento (A) (en 50 mm) %
-269	22	Antes	600 (61)	265 (27)	63
		Después	601 (62)	265 (27)	66

Tabla 9: Efecto de la exposición a temperaturas bajo cero sobre las propiedades de tracción, a temperatura ambiente, en materiales recocidos.

acero	forma	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	N	Cu	Ti
304 (A)	Forjado	0.05	0.61	0.53	18.53	0.07	10.72	0.005	0.028	0.04	0.005
304 (B)	Plancha	0.0075	0.38	1.71	18.46	-	10.90	-	-	-	-

Tabla 10: Forma y composición de los aceros 304 (A) y 304 (B).

Temperatura en °C	ambiente	100	200	300	400	500	600	700
Resistencia a la Tracción (Rm) <i>N/mm²(Kgf/mm²)</i>	590 (60)	530 (54)	480 (49)	440 (45)	420 (43)	375 (38)	315 (32)	235 (24)
Limite elástico (Rp) <i>N/mm²(Kgf/mm²)</i>	245 (25)	195 (20)	155 (16)	130 (13)	120 (12)	110 (11)	100 (10)	90 (9)
Alargamiento (A) %	62	56	54	50	45	40	38	37

Tabla11: Propiedades de tracción orientativas a varias temperaturas.

Condición	Modulo secante En tracción a <i>72.5 N/mm²</i>	Módulo secante en cizallamiento a			
		<i>43.15 N/mm²</i>	<i>86.3 N/mm²</i>	<i>103 N/mm²</i>	<i>207 N/mm²</i>
Recocido	<i>195 kN/mm²</i>	<i>75.5 kN/mm²</i>	-	<i>72.6 kN/mm²</i>	-
¼ duro	-	-	<i>73.5 kN/mm²</i>	-	<i>68.5 kN/mm²</i>
½ duro	-	-	<i>67.7 kN/mm²</i>	-	<i>66.7 kN/mm²</i>

Tabla12: Módulos secantes, en tracción y en cizallamiento.

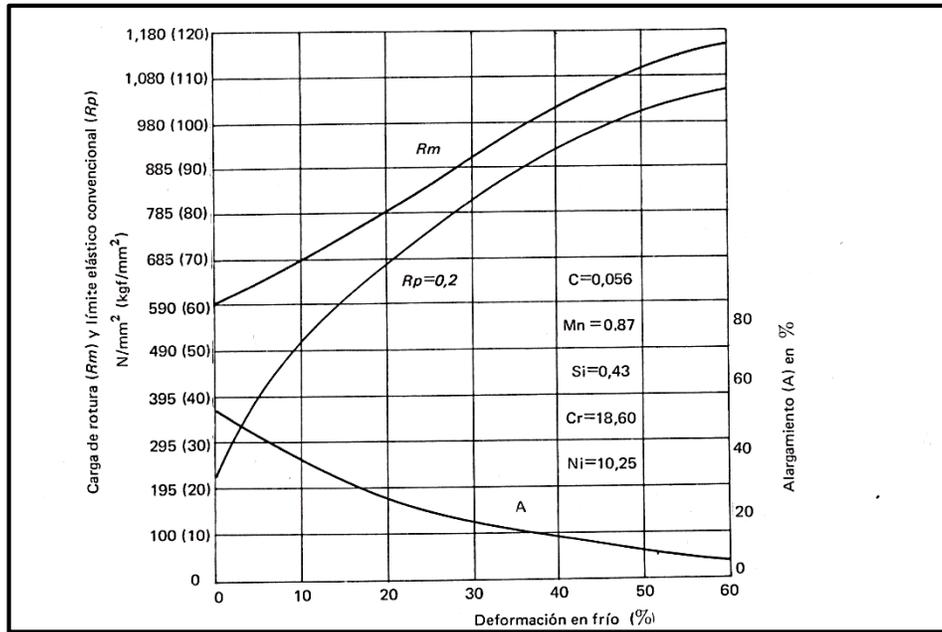


Figura 6: Efecto de la deformación en frío sobre las propiedades de tracción, a temperatura ambiente. Estas curvas corresponden a materiales que previamente han sido transformados en caliente y recocidos.

Temperatura °C	Módulo de elasticidad (tracción) $k N/mm^2 (Kgf/mm^2)$	Módulo de rigidez (cizallamiento) $k N/mm^2 (Kgf/mm^2)$
20	196 (20,000)	79.5 (8,100)
90	192 (19,600)	76.5 (7,800)
150	188 (19,100)	74.5 (7,600)
200	184 (18,700)	72.5 (7,400)
260	180 (18,300)	70.5 (7,200)
320	177 (18,000)	69.0 (7,000)
370	171 (17,400)	67.0 (6,800)
430	166 (16,900)	65.5 (6,700)
480	160 (16,300)	64.0 (6,500)
540	155 (15,800)	62.0 (6,300)
590	150 (15,300)	60.0 (6,100)
650	145 (14,800)	57.0 (5,800)
700	140 (14,300)	55.0 (5,600)
760	134 (13,600)	53.0 (5,400)
820	125 (12,700)	51.0 (5,200)

Tabla13: Módulo de elasticidad y módulo de rigidez a varias temperaturas.

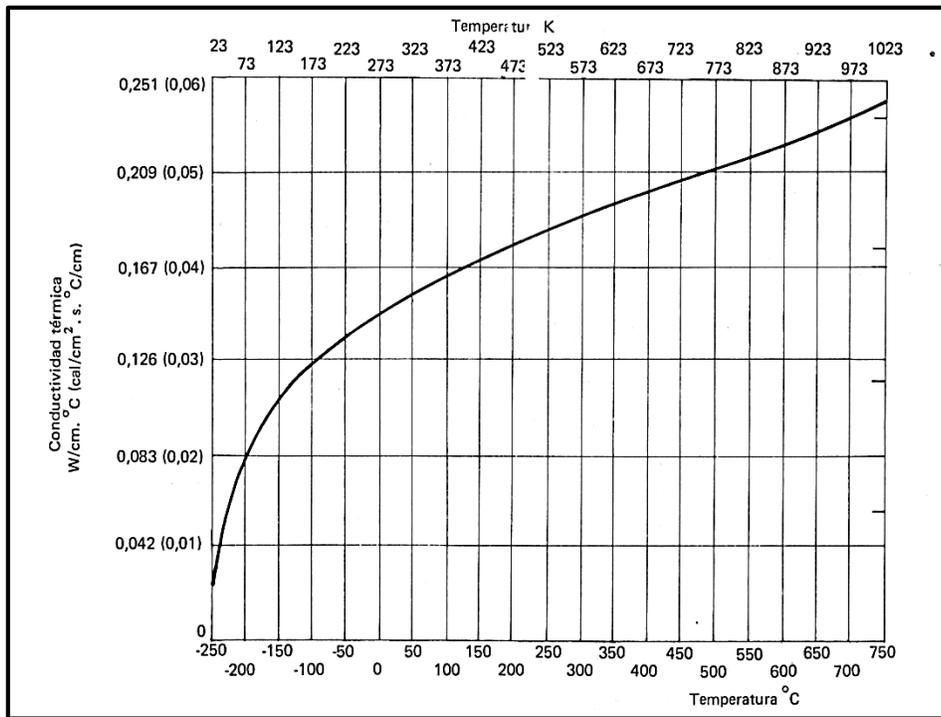


Figura 7: Conductividad térmica en función de la temperatura.

estado	Límite de fatiga, en N/mm^2 (Kgf/mm^2)
½ duro	480 (49)
¾ duro	640 (65)

Tabla14: Límites de fatiga representativos, a temperatura ambiente, para materiales deformados en frío.

Temperatura en °C	20	90	200	320	430	540	650	760	870
Resistividad	72	78	86	95	102	108	114	118	125

Tabla15: Resistividad eléctrica a varias temperaturas ($\mu\Omega \cdot cm$).

Resistencia a la oxidación en medios húmedos de altas temperaturas

El trabajo a altas temperaturas es indispensable en muchas industrias como la química, energética, transporte y aeroespacial entre otras, donde el aumento de temperatura de operación conlleva a una mayor eficiencia en los procesos, aumentando la productividad de las empresas y obteniendo mayores beneficios económicos. Las aplicaciones que requieren los materiales para trabajar a altas temperaturas, deben exigir la permanencia de las propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión a las temperaturas de trabajo.

En la industria energética, por ejemplo, se busca reducir los niveles de CO_2 y del consumo de combustible, ya que un aumento en la temperatura de operación del vapor y de la presión del vapor, permiten una reducción del consumo de combustible aumentando así el rendimiento del proceso y la reducción de los niveles de CO_2 . Algunos aceros tienen una buena resistencia a la oxidación en servicio cuando se exponen ante ambientes con oxígeno o aire, pero en ambientes que contiene vapor de agua, como ocurren en el caso crítico de las centrales eléctricas, donde se puede ver un incremento en la oxidación de un gran número de aceros.

En los problemas de corrosión solo basta la actividad del oxígeno para producir oxidación, así mismo, estas actividades esta controladas por la relación CO/CO_2 o H_2/H_2O en un medio agresivo, siendo los medios reductores más agresivos que los medios oxidantes, debido a que se forma la capa de óxido protector de forma más lenta. La resistencia a la corrosión a altas temperaturas de las aleaciones que contienen cromo permite que se forma una capa compacta y continua de óxido rico en cromo que protege al material de la oxidación.

El contenido necesario de cromo en la capa protectora será dado por la composición de cada aleación, así como, también la temperatura y la atmosfera de trabajo.

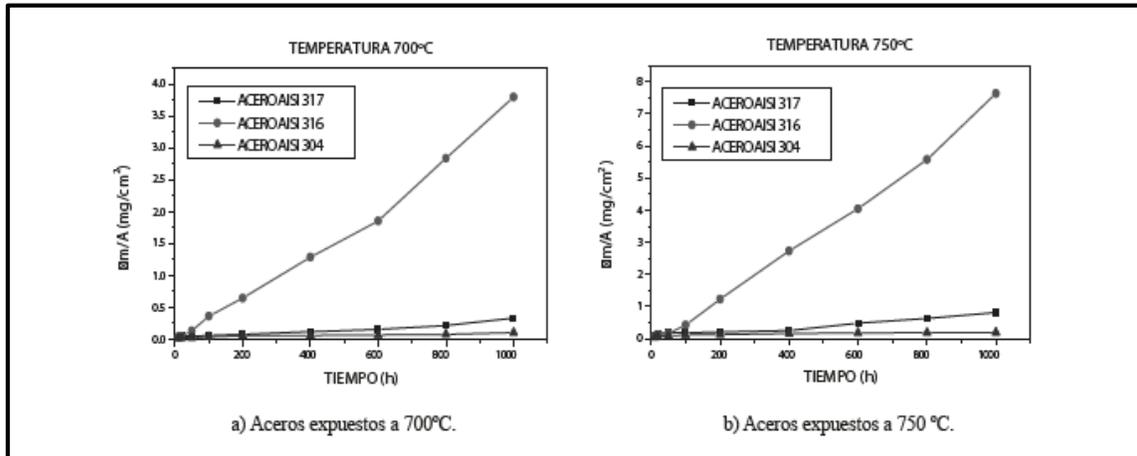


Figura 8: Ganancia de masa vs. Tiempo de los aceros oxidados en el trabajo, a) 700°C de oxidación y b) 750°C de oxidación.

En comparación, los aceros inoxidable martensíticos y ferríticos poseen una buena resistencia a la oxidación en atmosferas oxidantes secas y temperaturas elevadas, debido a su capacidad de generar una capa protectora de cromo rica en $(Cr, Fe)_2O_3$. Sin embargo, su resistencia a la oxidación se reduce en atmosferas húmedas, desde una temperatura de 600 °C, pierden porcentajes críticos de cromo debido a que el vapor de agua reacciona con el óxido de cromo (cromita) formando una especie volátil.

La pérdida de cromo en la capa de óxido conlleva al agotamiento del cromo en la aleación subyacente, permitiendo menor concentración de cromo en la interface de la aleación/capa de óxido al punto de que se forma una capa no protectora rica en fierro. Para prevenir la oxidación catastrófica es necesario que la aleación genere suficiente cromo en la interface capa de óxido-metal para compensar el consumo de cromo por la oxidación producida por el vapor.

Con lo anterior mencionado, los aceros inoxidable austeníticos, más específicamente, el acero AISI 304 a través de termogravimetrías y en contraposición del AISI 316 y AISI 317, aceros que son ampliamente utilizados, el AISI 304 presenta menor ganancia de masa que los anteriores mencionados pues a temperaturas de 700 °C y 750 °C en una atmosfera próxima del 100% de vapor presenta mejor resistencia a la oxidación de vapor.

Esto se debe a que posee una mayor proporción de cromo y silicio, junto con las grandes concentraciones de manganeso permite formar varios óxidos protectores y espinelas que ayudan a evitar la oxidación catastrófica.

En el acero, si bien el cromo tiene una gran influencia en la velocidad de oxidación, pues el 316 contiene un 2% menos y es el que menor resiste a la oxidación en vapor, los demás elementos también juegan un papel muy importante.

Se ha observado que en la superficie del acero AISI 304 oxidado en vapor a 750 °C. A 200h presenta una morfología rugosa con muchas agujas, siendo esta la morfología propia de la hematita. A medida que se va incrementando el tiempo hasta 600h se muestra otra forma de crecimiento del óxido, observándose una gran variedad de pequeños cristales, siendo esta morfología propia de la magnetita. Esto es que, en tiempos iniciales (hasta 200h) la capa de Fe_2O_3 es uno de los óxidos más predominantes en este acero, a medida que se incrementa el tiempo de exposición la capa más predominante es la magnetita, así mismo concentraciones de manganeso y silicio formados en óxido o espinelas protectoras.

A través de análisis de línea por EDAX (análisis de rayos x por dispersión de energía) se han observado una cascarilla de óxido rico en cromo y oxígeno, siendo este compacto, uniforme y de espesor de 2 a 5 μm .

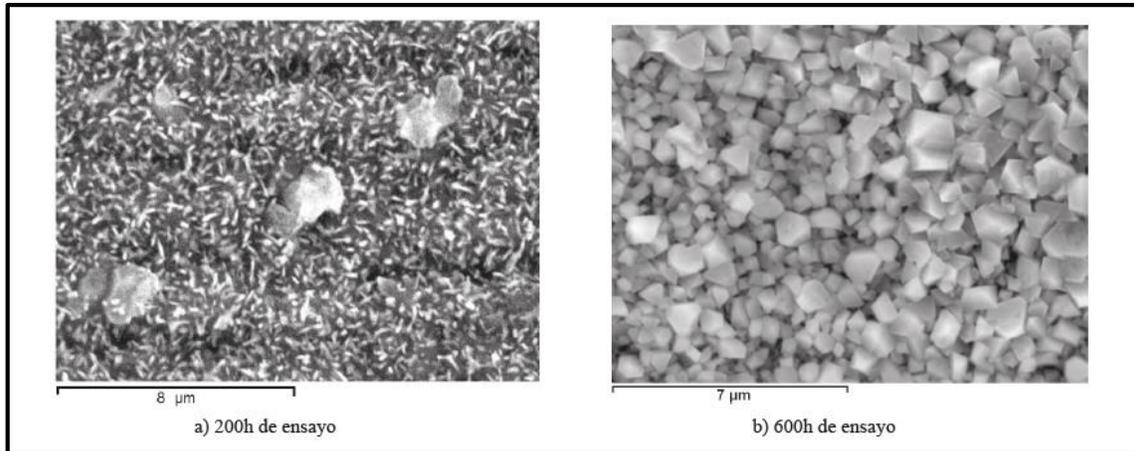


figura 9: Micrografías SEM a diferentes aumentos de la superficie del acero AISI 304, oxidado en vapor a 750°C y a diferentes tiempos de exposición.

Además, el perfil de concentración nos muestra pequeñas cantidades de manganeso y níquel disueltas en el interior del óxido. Dentro de las cuales se observan posibles en la superficie una espinela mixta ($MnCr_2O_4$), junto con posibles formaciones de óxidos mixtos de los elementos ya mencionados (níquel, manganeso, cromo, oxígeno) de gran carácter protector frente a estas condiciones de oxidación.

En el acero AISI 304 a 700°C de oxidación en vapor hasta 600h de oxidación, es muy difícil observar el espesor de cascarilla del óxido formado, debido al carácter protector de la posible espinela formada en su superficie, evita y disminuye la velocidad de oxidación.

En análisis de difracción de rayos X (XRD) del acero AISI 304, oxidado en vapor a 750 °C se ha comprobado presencia de diversas fases de óxidos ricos en cromo en la cascarilla del óxido: $Cr_{1.3}Fe_{1.7}O_3$ y el $(Fe_{0.6}Cr_{0.4})_2O_3$ y pequeñas cantidades de Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , Ni_6MnO_8 y $NiMnO_3$. Siendo posible que estos óxidos mixtos de cromo, níquel y manganeso ayuden a proteger el acero de estas condiciones de oxidación.

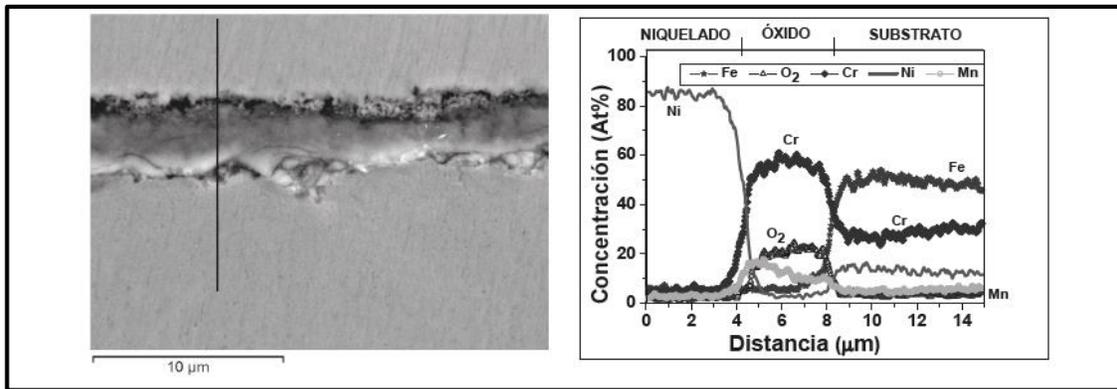


Figura10: Imagen SEM y el análisis de línea del corte transversal del acero AISI 304 oxidado en vapor a 750°C por 600h.

El mecanismo general de oxidación; la interacción del vapor de agua con la superficie del acero, donde encuentra al Fe y Cr, formando especies volátiles de estos elementos hasta que finalmente son formadas algunas capas protectoras sobre la muestra, como son la cromita (Cr_2O_3), óxidos mixtos y espinelas mixtas del tipo $(Fe, Cr)_xO_y$.

Estas capas evitan la oxidación del acero, hasta que en cierto tiempo se pierde el porcentaje crítico de Cr, por volatilización de especies o oxihidróxidos de Cr, que se formaron sobre su superficie con el vapor; $CrO_2(OH)_2(g)$, $CrO_2(OH)(g)$, etc. En el instante que la cromita es degradada, comienza a aumentar la tasa de oxidación en el acero y por consiguiente se produce la catástrofe de la oxidación. Inicialmente aparecen centros de oxidación, de forma circular, que con el tiempo se convierten de forma globular y finalmente, el resultado es la formación de la cascarilla del óxido del acero, conteniendo fases ricas en hierro y oxígeno; la hematita (Fe_2O_3) y la magnetita (Fe_3O_4). Cuando el tiempo del ensayo es incrementado, el espesor del óxido de la muestra se incrementa tanto, que debido a las microtensiones en la interfase con el acero se fractura, perdiendo totalmente la cascarilla del óxido y luego, nuevamente se reinicia el proceso de la oxidación.

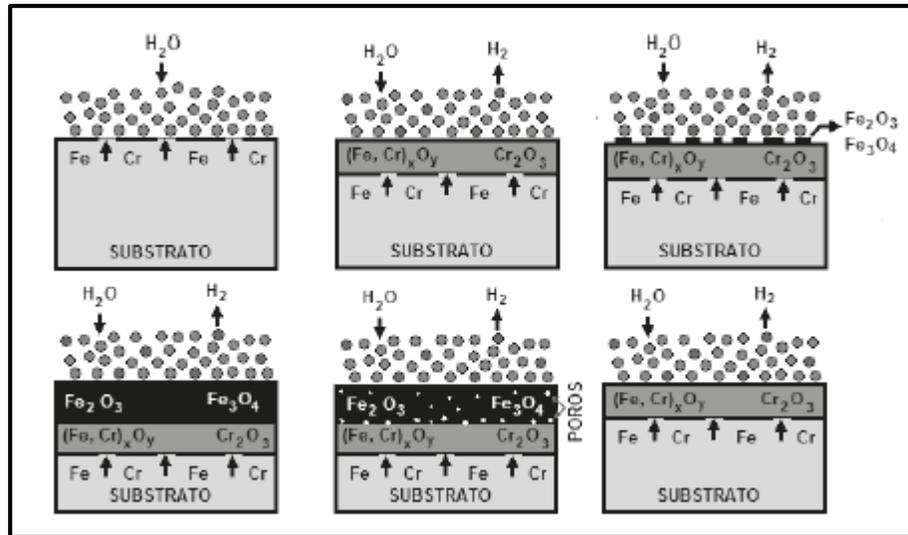


Figura 11: Esquema del proceso de oxidación en vapor sobre los aceros inoxidables austeníticos del trabajo.

Aplicaciones

Dentro de sus diversas aplicaciones se tienen, por ejemplo:

- Revestimiento de la tolva de carbón
- Equipo de cocina
- Recipientes nucleares
- Sujetadores y equipos marinos
- Aditamentos sanitarios
- Pantallas de filtro de pozo de petróleo
- Equipos de procesamiento de comida
- Equipos de enfriamiento
- Tubería de agua de alimentación
- Equipos químicos
- Entre otras.

CAPITULO II. PROCESOS DE SOLDADURA

2.1 GENERALIDADES SOBRE SOLDADURA.

Soldar es unir sólidamente dos piezas metálicas o dos partes de una misma pieza. Esta unión se realiza, elevando la temperatura de las superficies a soldar, puestas en contacto, sin aportación de alguna sustancia o con aportación de una sustancia igual o semejante a las piezas a soldar.

Los procedimientos actualmente conocidos para la soldadura de metales, pueden clasificarse en:

- Soldaduras heterogéneas: son las que sueldan materiales de distinta naturaleza, con o sin metal de aportación o cuando los metales a unirse son iguales, pero con distinto metal de aporte.
- Soldaduras Homogéneas: son las que, tanto los materiales que se sueldan como el metal de aporte, poseen la misma naturaleza. Si las soldaduras se efectúan sin el metal de aportación, se denominan autógenas.

Las estructuras se forman mediante conjuntos de chapas o perfiles unidos entre sí con enlaces capaces de soportar los esfuerzos que se transmiten entre las piezas.

El objeto principal de la unión es el de asegurar la mejor continuidad de las piezas, continuidad que será más perfecta cuanto más uniforme sea la transmisión del esfuerzo.

La transmisión de esfuerzos en las uniones se hace en muchas ocasiones de modo indirecto, ya que para pasar el esfuerzo de una pieza a otra se la obliga previamente a desviarse de su trayectoria normal.

Los dos métodos básicos para la soldadura de los aceros inoxidable son la soldadura por fusión y la soldadura por resistencia. En la soldadura por fusión el calor proviene de un arco eléctrico.

Existen diversos procesos de soldadura los que difieren en el modo en que se aplica el calor o la energía para la unión. A continuación, se presenta una manera general de agruparlos:

1. Soldadura por forja.
2. Soldadura en frío.
3. Soldadura por fricción.
4. Soldadura ultrasónica.
5. Soldadura por explosión.
6. Soldadura por gas.
7. Soldadura por rayo láser.
8. Soldadura blanda.
9. Soldadura fuerte.
10. Soldadura por resistencia.
11. Soldadura por inducción.
12. Soldadura por vaciado.
13. Soldadura de arco con plasma.
14. Soldadura ultrasónica.
15. Soldadura por arco sumergido.

Existen cerca de cuarenta sistemas de soldar, pero el más importante para las estructuras metálicas en el sistema de soldadura por fusión

Soldadura por forja:

En este proceso las partes de metal que se van a soldar se calientan a una forja que utiliza carbón vegetal o carbón mineral para producir el calor necesario.

Los metales por unir se calientan, entonces se colocan juntos de tal manera que las superficies puedan ser forzadas una con otra golpeando con un martillo, la presión de los golpes del martillo y el calor extra producido por el martillo, unen las piezas.



FIGURA 12: Soldadura por forja.

Soldadura por fricción

La soldadura por fricción es un proceso en el cual el calor para soldar se produce por conversiones directa de energía mecánica a energía térmica en las superficies de contacto de las piezas son aplicación de energía eléctrica, o calor de otras fuentes a las piezas.

La soldadura por fricción se hace manteniendo una pieza no rotatoria en contacto con una pieza rotatoria bajo presión constante o que se incrementa gradualmente hasta que las superficies de contacto alcanzan la temperatura de soldadura, y luego deteniendo la rotación para completar la soldadura. El calor de fricción desarrollado en las superficies de contacto incrementa rápidamente la

temperatura de las piezas sobre una distancia axial muy corta a valores que se acercan al rango de fusión, la soldadura ocurre bajo la influencia de una presión que se aplica mientras la zona afectada está en el rango de temperatura plástica.

Puede ser usada para unir láminas de aluminio y planchas sin la necesidad de usar material de aporte o ningún tipo de gas y materiales de espesor de 1.6 a 30 mm pueden ser soldados con total penetración, sin porosidad interna.

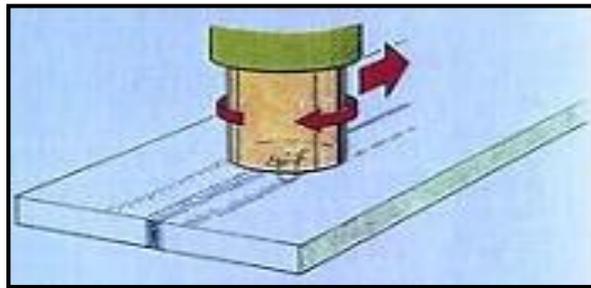


FIGURA 13: Soldadura por fricción.

Soldadura ultrasónica.

Es un proceso en estado sólido donde se produce coalescencia mediante aplicación concentrada de energía vibratoria de alta frecuencia a las piezas de trabajo mientras están sujetas a presión. Aunque hay cierto aumento de la temperatura en las superficies a unir, siempre es mucho menor que los puntos de fusión de los materiales. Parece que las rápidas inversiones de esfuerzos sobre las superficies de contacto de la unión juegan un papel importante al facilitar la coalescencia rompiendo y dispersando las películas en las superficies que se unen.

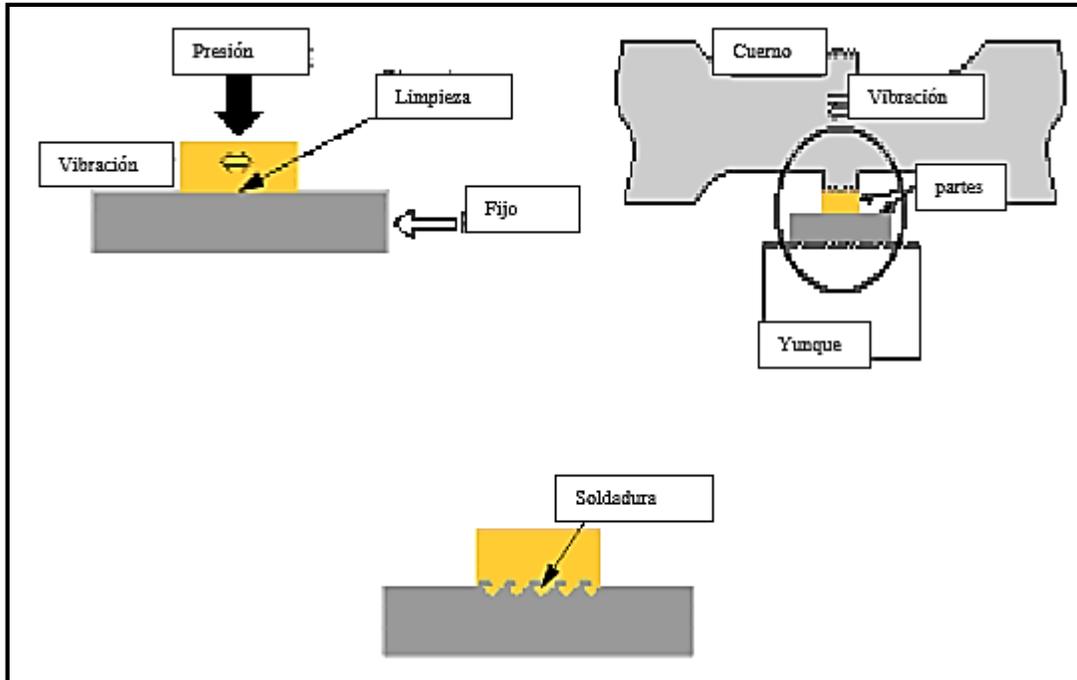


FIGURA 14: Soldadura ultrasónica.

Soldadura por explosión.

Este proceso se usa principalmente para unir placas de metales resistentes a la corrosión a placas más pesadas de metales base (revestimiento de acero inoxidable), especialmente donde están involucradas grandes áreas. Un material explosivo, generalmente en forma de lámina, se coloca arriba de las dos capas de metal y se detona progresivamente. Una onda compresiva de esfuerzos de orden de miles de mega pascales avanza a lo largo de las superficies de las placas, de manera que se forma un pequeño ángulo abierto entre las dos superficies limpias que se unen bajo la alta presión. El resultado es una soldadura fría que tiene una configuración ondulada en las superficies de contacto.

Soldadura por gas.

La soldadura por gas comprende un grupo de procesos de soldadura que utilizan como fuente de calor a una flama que resulta al quemarse un gas

combustible y oxígeno, mezclados en proporciones adecuadas. Normalmente el oxígeno se provee en forma relativamente pura, pero puede en raras ocasiones, provenir de aire. Las superficies a unir se funden progresivamente mediante calor de una flama de gas, con o sin metal de aporte, y se inducen a fluir juntas y solidificar sin aplicación de presión a las partes que se sueldan.

La mayor parte de soldadura se hace con una flama neutral debida a que tal flama tiene un efecto químico mínimo en la mayoría de metales calentados.

Soldadura por rayo láser.

La soldadura por rayo láser puede aplicarse de forma satisfactoria para unir diferentes metales. Usa la energía aportada por un haz de luz láser que genera un punto de densidad de alta energía de aproximadamente 2 mm de diámetro para poder unir dos materiales a partir de su fundición. No necesita material de aporte por medio de espejos se manda toda la energía el láser emite a una zona reducida del material que es justo el espacio que quiere unir.

La alta presión y alta temperatura causadas por la absorción de energía plasma, continúa mientras se produce el movimiento del cabezal arrastrando la “gota” de plasma rodeada con material fundido a lo largo de todo el cordón de soldadura.

Dependiendo de la aplicación de la soldadura, el láser de la misma puede ser amplificado en una mezcla de itrio, aluminio, granate y neodimio, si se requiere un láser de baja potencia, o el amplificado por gas como el dióxido de carbono, con potencias superiores a los 10 kilovatios y que por tanto son empleados en soldaduras convencionales.

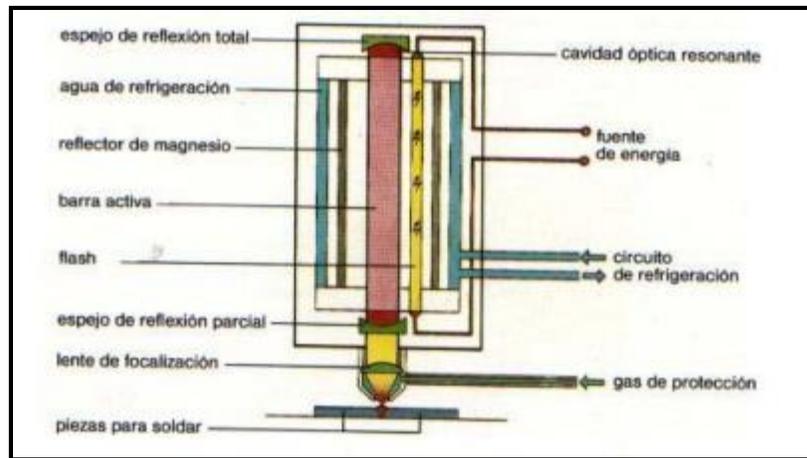


FIGURA 15: Soldadura por rayo láser.

Soldadura por arco con electrodo recubierto.

Este tipo de soldadura utiliza electrodos que consisten en un alambre de metal, generalmente con un diámetro 1/16 a 3/8 de pulgada, sobre la cual se ha extruido un recubrimiento que contiene componentes químicos para adicionar un número de características deseables, incluyendo todas o parte de las siguientes:

- Proporcionar una atmosfera protectora.
- Estabilizar el arco
- Actuar como fundente para remover impurezas del metal fundido.
- Proporcionar una escoria protectora para acumular impurezas, evitar oxidación y retardar el enfriamiento del metal de soldadura.
- Reducir las salpicaduras e incrementar la eficiencia de deposición.
- Adicionar elementos de aleación
- Afectar la penetración del arco
- Conformar el cordón de soldadura
- Proporcionar metal relleno adicional

Los electrodos recubiertos se clasifican en base a la resistencia a la tensión del metal de soldadura, la posición en la que pueden ser utilizados, el tipo de corriente y la polaridad (para corriente directa) y el tipo de recubrimiento.

Se utiliza la designación de 4 o 5 dígitos como, por ejemplo, el tipo E-7016 es un electrodo de acero de baja aleación que proporcionara un deposito que tendrá una resistencia mínima de tensión de 70,000 lb/pulg² en la condición de esfuerzos no relevados; pueden ser utilizados en cualquier posición y ya sea en corriente alterna o con corriente directa y polaridad invertida, tienen un recubrimiento básico.

Soldadura blanda.

La soldadura blanda comprende todas aquellas aleaciones cuyas temperaturas de trabajo sean inferiores a 500°C. Entre los metales que en sus diferentes proporciones forman aleaciones que cumplen esta condición cabe resaltar el estaño, plata, cobre y plomo. La combinación de estos metales y en proporciones adecuadas, hace que se obtengan diversas aleaciones que se adapten a cada necesidad.

En una aleación se busca la combinación de las siguientes características:

- 1.-Dureza en estado solido
- 2.-Elasticidad, en estado solido
- 3.- Fluidez, en estado liquido
- 4.- Temperatura de trabajo
- 5.- Costo económico

En función del tipo de unión que queremos obtener, y de los metales a unir, deberemos combinar las anteriores características a base de mezclar metales en proporciones adecuadas.

Soldadura fuerte.

En esta soldadura se aplica también material de aporte en estado líquido, pero este metal, por lo regular no ferroso, tiene su punto de fusión superior a las 430°C y menos que la temperatura de fusión del metal base. Por lo regular se requiere de fundentes especiales para remover los óxidos de las superficies a unir y aumentar la fluidez al metal de aporte. Algunos de los metales de aporte son aleaciones de cobre, aluminio o plata.

Dos características destacables de una junta de soldadura fuerte son su alta resistencia y el bajo calor que se utiliza para hacerla. Generalmente, una junta de soldadura fuerte realizada correctamente será más fuerte que los metales que se están uniendo. Y la temperatura a la cual se hace la junta es mucho más baja que la temperatura de fusión de los metales que se están uniendo.

La soldadura fuerte se puede clasificar por la forma en la que se aplica el metal de aporte. A continuación, alguna de estos métodos:

Inmersión. El metal de aporte previamente fundido se introduce entre las dos piezas que se van a unir cuando este se solidifica las piezas quedan unidas.

Horno. El metal de aporte en estado sólido, se pone entre las piezas a unir, estas son calentadas en un horno de gas o eléctrico, para que con la temperatura se derrita al metal de aporte y se genere la unión al enfriarse.

Soplete. El calor se aplica con un soplete de manera local en las partes del metal a unir, el metal de aporte en forma de alambre se derrite en la junta. Los sopletes pueden funcionar con los siguientes comburentes: aire inyectado a presión, aire de la atmósfera, oxígeno o aire almacenado de presión en un tanque. Los combustibles pueden ser alcohol, gasolina blanca, metano, hidrógeno o acetileno.

Electricidad. La temperatura de las partes a unir y del metal de aporte se puede lograr por medio de resistencia a la corriente, por inducción o por arco eléctrico, en los tres métodos el calentamiento se da por el paso de la corriente entre las piezas metálicas a unir

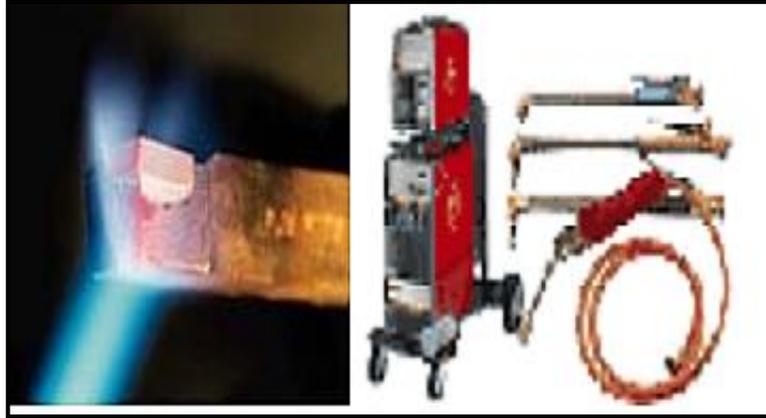


FIGURA 16: Soldadura fuerte.

Soldadura por resistencia

El principio del funcionamiento de este proceso consiste en hacer pasar una corriente eléctrica de gran intensidad a través de los metales que se van a unir, como en la unión de los mismos la resistencia es mayor que en sus cuerpos se genera el aumento de temperatura aprovechando esta energía y con un poco de presión se logra la unión. La corriente eléctrica pasa por un transformador en el que se reduce el voltaje de 120 o 240 a 4 o 12 V y se eleva el amperaje considerablemente para aumentar la temperatura.

Soldadura por inducción.

Esta soldadura se produce al aprovechar el calor generado por la resistencia que se tiene al flujo de la corriente eléctrica inducida en las piezas a unir. Por lo regular esta soldadura se logra también con presión. Consiste en la conexión de una bobina a los metales a unir, y debido a que en la unión de los metales se da más resistencia al paso de la corriente inducida en esa parte es en la que se genera, calor, lo que con frecuencia utiliza corrientes con el rango de 200,000 a 500,000 Hz de frecuencia, los sistemas de soldaduras por inducción normales solo utilizan frecuencias entre los 400 y 450Hz.

Soldadura por vaciado

Con algunos materiales la unión no se puede hacer por los procedimientos antes descritos debido a que no fácilmente aceptan los metales de aporte. Para lograr una soldadura de estos metales es necesario fundir el mismo metal que se va a unir, dejándolo enfriar con lentitud, para que se adapte a la forma de molde, con ello cuando solidifica las piezas quedan unidas.

A este procedimiento se le conoce como fundición por vaciado y se utiliza a veces para reparar piezas fundidas que tienen grietas o defectos

Soldadura de arco con plasma PAW

La soldadura de plasma PAW, es un proceso muy similar al proceso de soldadura TIG "GTWA", de hecho, es una evolución de este método, el cual está diseñado para incrementar la productividad.

En la soldadura por arco de plasma PAW, el uso del gas es algo más complejo, dos flujos de gases separados trabajan cada uno cumpliendo un papel diferente

Las partes que componen el proceso básico tenemos: un gas que fluye envolviendo el electrodo de tungsteno y, por consiguiente, formando el núcleo del arco de plasma y el escudo de gas que provee protección a la soldadura fundida

PAW es usado de tres maneras:

1. Soldadura micro plasma, con corrientes de soldadura de entre 1 amperio hasta 15.
2. Soldadura de plasma-mediano, con corrientes de soldadura de entre 20 hasta 100 amperios
3. Soldadura de cerradura, por encima de 100 amperios, donde el arco de plasma penetra el espesor de la pared. Es muy usado, por dejar juntas de alta calidad,

en la industria de la aviación y espacial, procesos químicos y las industrias petroleras.

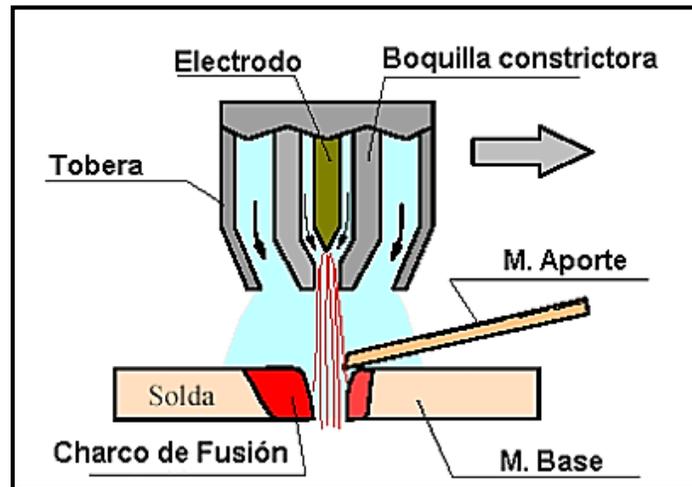


FIGURA 17: Soldadura de arco con plasma PAW.

Soldadura por corriente de electrones

El sistema de EBW se compone de una pistola del haz electrónico, de una fuente de alimentación, de sistema de control, del equipo del movimiento y del comportamiento de la soldadura al vacío. La fusión de metales bajos elimina la necesidad de metales de relleno. El requisito del vacío para la operación del equipo del haz electrónico elimina la necesidad de blindar los gases y los flujos.

La pistola del haz electrónico tiene un filamento que se calienta. Los electrones se aceleran de la fuente con potencial de alto voltaje entre un cátodo y un ánodo.

Soldadura ultrasónica

La soldadura ultrasónica metálica utiliza vibraciones de alta frecuencia. Consiste en colocar las partes a soldar en un yunque, enseguida, se aplica presión a las paredes. Entonces la parte superior es vibrada atrás y adelante con el cuerno

ultrasónico; esto causa a las partes frotar juntas. La energía ultrasónica dispersa la película en capas (limpiando las superficies) y provoca el mezclado de los átomos de metal. La actividad de los átomos metálicos junta el uno al otro causando verdadera unión metalúrgica.

La soldadura de metal ultrasónica es alguna vez llamada (soldadura fría) por que actúa sin fundir los metales. Se limpia y une a temperaturas más bajas que el punto de fusión de los metales. La soldadura ultrasónica más comúnmente une metales no ferrosos, pero también puede ser usada con otros metales, como cuando se quiere unir aluminio.

Soldadura por arco robótica.

La soldadura significa soldar, es decir, funcionando y controlando por equipo robótico. En general el equipo para soldadura por arco automático es diseñado de otra manera que la usada por arco de soldadura manual. La soldadura de arco automática envuelve ciclos de servicio alto, y el equipo de soldadura debe poder operar bajo estas condiciones. En adición, los componentes del equipo deben tener características y controles necesarios para interconectar con el sistema de control principal. Durante el corto tiempo que los robots para soldadura industrial han estado en uso, el brazo articulado o tipo revolución se ha vuelto por mucho el más popular. El ángulo de la antorcha y el ángulo de viraje puede ser cambiado para hacer soldaduras de buena calidad en todas posiciones.

Soldadura por arco sumergido

En la soldadura de arco sumergido, el calor para la fusión es proporcionado por un arco voltaico pulsado entre el objeto y el electrodo consumible.

La protección es proporcionada por un fundente de tipo granular, depositada, sobre el área que se soldará con autógena.

Características del proceso:

- Utiliza un alambre consumible.
- Es blindado por un fundente granular que se vaporiza parcialmente.
- Tiene un depósito de la escoria que protege el depósito.
- Es capaz de altas velocidades de soldadura.

Al igual que en los demás procesos de soldadura por arco, este es un proceso en el cual el calor es aportado por un arco eléctrico generado entre uno o más electrodos y la pieza de trabajo.

El arco eléctrico mencionado está sumergido en una capa de fundente granulado que lo cubre totalmente protegiendo el metal depositado durante la soldadura. De aquí el nombre del proceso.

Una ventaja del proceso es que, estando el arco completamente encerrado, pueden utilizarse intensidades de corriente extremadamente elevadas sin chisporroteo o arrastre de aire. Las intensidades elevadas producen una penetración profunda y el proceso es térmicamente eficiente, puesto que la mayor parte del arco está bajo la superficie de la plancha.

Es un proceso de alta dilución, en el que aproximadamente se funde dos veces más metal base que electrodo. La corriente que se utiliza tiene intensidades de 200 a 2000 amperes, aunque en sus inicios del proceso se emplearon intensidades de hasta 5000 amperes

La soldadura por arco sumergido ha encontrado su principal aplicación en los aceros de bajo carbono y de baja aleación, aunque con el desarrollo de los fundentes adecuados el proceso se ha usado también para el cobre, aleaciones a bases de aluminio y titanio, aceros de alta resistencia, aceros templados y revenidos y en muchos tipos de aceros inoxidables.

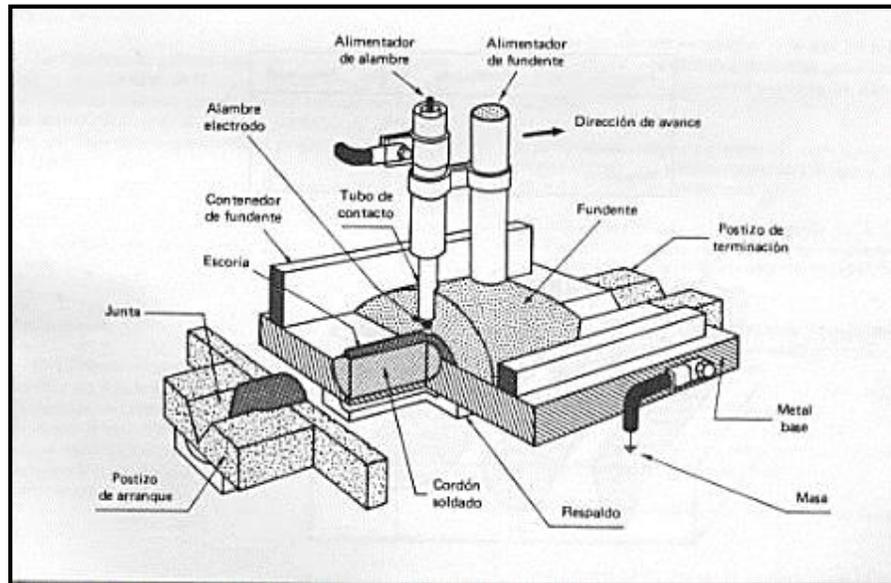


FIGURA 18: Soldadura de arco con plasma PAW.

2.3 Soldabilidad.

Soldabilidad de los aceros inoxidables.

El concepto de soldabilidad, en el caso de los aceros inoxidables depende principalmente de la estructura metalúrgica predominante. Así se considera que la soldabilidad en general de todos los aceros pertenecientes a la familia de los inoxidables martensíticos es muy baja.

La soldabilidad de los aceros inoxidables ferríticos va desde aceptable a baja, según la composición química y su contenido en carbono; la soldadura afecta negativamente las propiedades cambiando sus características y su microestructura. La soldabilidad, en cambio, de los aceros inoxidables dúplex como en los austeníticos es muy buena. Como la investigación se centra en los aceros inoxidables austeníticos los siguientes puntos explican su soldabilidad.

Soldabilidad de los aceros inoxidables austeníticos.

Los aceros inoxidables austeníticos son por lo general, considerados los más soldables de todas las familias de los aceros inoxidables. Estos pueden ser soldados sin ningún problema utilizando procesos de soldadura por arco. Aunque la soldabilidad de estos aceros es por lo general muy buena, realizar un inadecuado proceso de soldadura puede producir resultados indeseables o problemas, tanto en el metal base como en el cordón de soldadura. Siendo alguno de estos, la sensitización o pérdida de resistencia a la corrosión intergranular, y la fisuración en caliente. Todos estos fenómenos deben de ser considerados en el diseño de los procedimientos de la soldadura empleados en la soldadura de los aceros inoxidables.

Arco del metal protegido y arco de gas inerte. Soldando con arco de metal protegido es más satisfactorio en aplicaciones a altas temperaturas. Los electrodos revestidos básicos (AWS E310-15 de alto carbono) son usados para soldar con arco de metal protegido. El alambre desnudo de 0.80 a 2.3 mm de diámetro es usado como metal de aporte en procesos de arco con electrodo de tungsteno. No requieren tratamiento térmico después de soldar.

Los aceros inoxidables se diferencian de los demás aceros durante los procesos de soldadura por los cambios morfológicos que sufren cuando se aplica el ciclo térmico de soldadura. Estos cambios son notables por la modificación de la microestructura, por las características de la zona afectada por el calor y por los cambios de la microestructura en la zona de fusión.

Generalmente las bajas temperaturas de transformación promueven una fina precipitación de la fase ferrita, debido a que se incrementa la nucleación de esta y la velocidad de crecimiento de grano disminuye en función del decremento de la temperatura de transformación, por lo tanto, la ferrita de grano fino es producida a bajas temperaturas de transformación.

Cuando la nucleación de la fase ferrita toma lugar en los bordes de grano de la fase austenita, la transformación de austenita a ferrita es facilitada al incrementarse las áreas de los bordes de grano de la fase austenita.

Los cambios estructurales en el metal de soldadura sucederán durante el enfriamiento; en condiciones de movimiento restringido, las zonas que se vieron durante la deformación plástica en caliente resultan cortas para ocupar los nuevos espacios alcanzados y aparecen entonces tensiones térmicas de tracción. Al alcanzarse la temperatura ambiente habrán quedado tensiones térmicas permanentes de tracción cuyo valor es del orden del límite de fluencia del material. Sin embargo, las microestructuras resultantes difieren de las transformaciones antes mencionadas debido al comportamiento isotérmico de los procesos de soldadura.

La evolución microestructural de la zona afectada por el calor (ZAC) en los aceros inoxidable depende de factores como la microestructura del metal base, la temperatura máxima que se alcanza y las velocidades de calentamiento y enfriamiento que se dan. Esquematizando las diferentes regiones en la ZAC, en la zona supercrítica es donde ocurre el crecimiento de grano, por lo que se considerada como la región más frágil del ZAC.

Generalmente, la microestructura resultante en la ZAC es diferente a la que presenta el metal base, pero muy parecidas a la del metal de soldadura en los aceros inoxidable. La ZAC se presenta en una región estrecha difícil de distinguir, la formación de la ZAC puede ser explicada en función de los ciclos térmicos estos y de las temperaturas a las que este expuesta.

Los parámetros estructurales relacionados con la tenacidad son el tamaño de grano de la ZAC y la fracción volumétrica de las islas de martensita-austenita, lo que se conoce como constituyente M-A

2.5 Aspectos metalúrgicos de la soldadura.

Zona afectada por el calor.

Los aspectos metalúrgicos de los que tiene un lugar en la zona de la soldadura durante el enfriamiento, difieren algo de lo que se observa durante el enfriamiento de una pieza fundida. En la soldadura el metal fundido se solidifica en cuestión de segundos.

Problemas frecuentes en la soldadura de los aceros inoxidable austeníticos, los más frecuentes hallados en la soldadura de los aceros inoxidable son:

Sensitización y corrosión intergranular: de acuerdo a la American Welding Society (AWS), este tipo de corrosión se presenta en soldaduras expuestas a ambientes ácidos, concentrándose el ataque en el metal base específicamente en la zona afectada por el calor. La base del ataque corrosivo se encuentra relacionado a un fenómeno conocido como sensitización, donde aceros no estabilizados (sin Ti o Nb en la aleación), cuando son expuestos o enfriados lentamente desde intervalos de temperaturas comprendidos entre 400 a 843°C, forman carburos ricos en cromo a lo largo de los límites de grano de la austenita.

Este intervalo de temperaturas es comúnmente conocido como intervalo de sensitización, debido a que la exposición de los aceros inoxidable austeníticos dentro de este intervalo los hace particularmente sensibles a la corrosión intergranular. Mecánicamente el ataque corrosivo ocurre y se localiza en un lugar inmediatamente adyacente al límite de grano en una región que ha sido disminuida en cromo, generalmente estimada en un 12 % en peso.

La fragilización es cuando los aceros inoxidable austeníticos a temperaturas comprendidas entre los 485-899°C, se pueden formar varias fases intermetálicas. De todas las fases intermetálicas, la más conocida, frecuente y predominantes en cantidad es la fase sigma, es un compuesto intermetálico duro, frágil y no magnético, siendo un precipitado típico en aceros altos en cromo y al cromo-níquel durante a recocida a temperaturas entre 600 y 900 ° C.

La fase sigma está formada por 52% de Cromo y 48% de hierro aproximadamente, y puede contener constituyentes adicionales como el molibdeno. Su formación está asociada a la ferrita delta del metal de soldadura y la ferrita remanente del metal base. Puede formarse de la austenita, pero es poco probable, ya que requeriría mayor tiempo a altas temperaturas para nuclear en comparación con la ferrita.

La cantidad de fase sigma que puede formarse en el metal de soldadura de los aceros inoxidable austeníticos es siempre menor que el contenido de ferrita presente. Esto se debe a que la fase sigma requiere de un alto contenido de cromo para su formación y crecimiento, siendo la ferrita de mayor contenido de cromo que la austenita, como consecuencia, altos contenidos de ferrita son requeridos para promover la fase sigma.

La presencia de la fase sigma está asociada al deterioro de las propiedades mecánicas, particularmente la ductilidad y resistencia al impacto, incrementando la fragilidad, por tratarse de una fase mucho más dura que la estructura base, sin embargo, pequeñas cantidades de la fase sigma (menos del 5% en volumen) pueden ser relativamente inofensivas, porque la fase tiende a ser discontinua en la microestructura, evitando redes continuas que pueden dar origen a fisuras.

Al igual que los carburos de cromo en la sensitización, la fase sigma puede disolverse por medio de un tratamiento de recocido de disolución o solubilización a 1050°C seguido de un temple en agua.

La fisuración en caliente, se considera este tipo de grietas como las más comunes ocurridas durante la soldadura de los aceros inoxidable austeníticos. Este término involucra dos clases de grietas, conocidas como grietas de solidificación y grietas de licuación, ambas producidas a altas temperaturas. Sin embargo, distinguir unas de otras por sus distintos modos de formación.

Las grietas de solidificación se producen cuando solidifica el metal de soldadura Este tipo de grietas se caracteriza por el hecho de que normalmente ocurre a lo largo de la línea central de la soldadura. Estas, siguen la estructura de

solidificación y se forman después de solidificarse el metal depositado si se desarrollan tensiones por una contracción excesiva, antes de que la última parte del metal fundido haya solidificado.

Durante la solidificación, las impurezas se concentran en el metal fundido, formando un líquido residual con punto de fusión más bajo que el resto del metal del metal de soldadura. Por lo tanto, el riesgo de grietas de solidificación es por consiguiente más probable cuando los metales base y/o aporte tienen un alto contenido de impurezas.

Las grietas de licuación suelen ocurrir en el cordón en la zona afectada por el calor del metal base, cuando se efectúan soldaduras múltiples. También tienen su origen en las fases de bajo punto de fusión que se forman por la concentración de impurezas. Este tipo de grietas significa que a menudo carecen de importancia práctica desde el punto de vista del comportamiento de una estructura, a diferencia de las grietas de solidificación.

En general, para reducir el riesgo de fisuración en caliente en la soldadura de los aceros inoxidable austeníticos, es preciso evitar que pudieran producir concentraciones grandes de impurezas en el baño de fusión. Se debe elegir un consumible que produzca un metal de soldadura con bajos porcentajes de ferrita. Además, la protección gaseosa deber ser adecuada.

2.6 Fundamentos de la soldadura disímil.

La soldadura disímil se refiere a la unión de dos metales o dos diferentes tipos de aleaciones. Así mismo, metales con diferentes composiciones dentro de un tipo en particular, como podrían ser aceros inoxidable austenítico, aceros inoxidable ferríticos, aceros inoxidable dúplex, entre otros.

Actualmente todas las soldaduras por fusión son uniones llamadas como soldaduras metálicas disímiles (DMWs) debido a que los metales que serán unidos tienen estructuras forjadas y la soldadura tienen estructuras de fundición; frecuentemente la estructura del metal de aporte correspondiente se altera deliberadamente del de las aleaciones base.

Este proceso tiene importantes aplicaciones en la industria pues la soldadura disímil de materiales ligeros es usada para conectar diferentes metales en las industrias automotrices, así mismo, usado donde un objeto es sujeto a múltiples ambientes en una aplicación como podría ser en la industria petroquímica, de generación de energía y las industrias de gas y aceite, esto a su vez, permite una reducción en los costos de fabricación.

Esto se deberá a que, cada sección de componente soldado puede optimizarse para una aplicación en específico, provee una tolerancia al daño sobre toda la estructura, un diseño optimizado por el emparejamiento del material correcto para el valor o propiedad requerida y grandes presentaciones de materiales usándose solamente aquel que es requerido y proporcione beneficios reales.

Su principal desventaja es que, la soldadura disímil de metales consiste en la mezcla de materiales que tienen propiedades desconocidas cuando estos son combinados con impares distribuciones de calor o estrés. Por lo cual es importante considerar sus factores metalúrgicos.

Factores metalúrgicos

Metalúrgicamente todas las soldaduras por fusión son soldaduras de metales disímiles puesto que, como se mencionó, la zona soldada tiene una estructura de fundición solidificada mientras que el metal base presenta una estructura forjada; la composición química del metal de soldadura depositado es un sobre desajuste o un desajuste bajo para la base de la resistencia que requieren las juntas del material base.

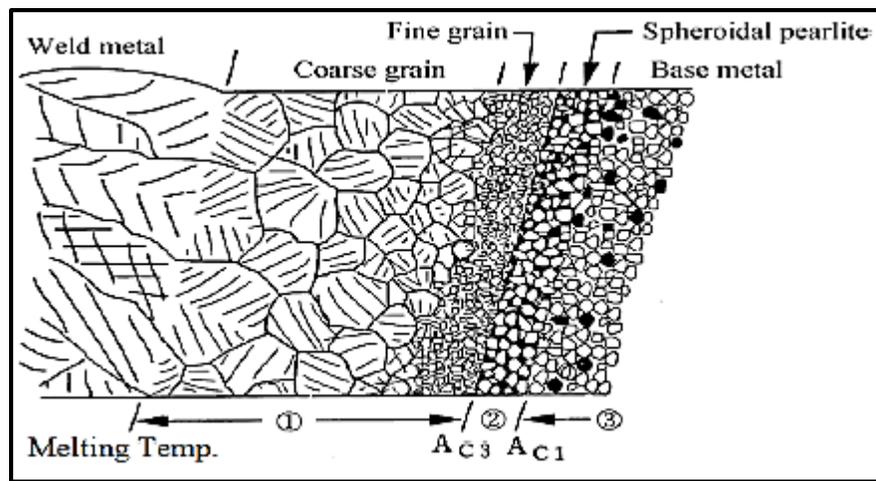


Figura 18 Estructuras de la zona soldada y el material base.

En la soldadura disímil de metales se debe considerar las propiedades de los tres metales: los dos metales que serán unidos y el metal de aporte que unirá a estos, por ejemplo, que uno de los metales que se va a unir es soldado con un precalentamiento cuando se suelda a sí mismo, el precalentamiento suele realizarse cuando se hace una soldadura metálica disímil (DMW). Otra variable podría ser el control del calor absorbido. En ocasiones este puede tener conflicto en que este control óptimo para un metal es indeseable para el otro. En este caso un arreglo es necesario. Esto es una razón para el desarrollo del procedimiento la DMW muchas veces requiere más estudio que la soldadura convencional o proceso de soldadura de metales similares.

El reto de las uniones disímiles se da en la existencia de la zona de transición entre los metales y los compuestos intermetálicos formados en la ZAC, si hay mutua solubilidad de los dos metales la unión disímil se puede hacer satisfactoriamente, en caso contrario, si esta es pequeña o no ha solubilidad entre los dos metales que son unidos la soldadura de unión no será satisfactoria. Así mismo, la existencia de compuestos intermetálicos permiten incrementar la sensibilidad al agrietamiento, reducir la ductilidad e incrementar la susceptibilidad a la corrosión.

Otro factor importante es la diferencia en el coeficiente de expansión térmica, el esfuerzo residual en las soldaduras es generado por la contracción térmica del metal soldado y del metal base.

Como resultado, la distribución del esfuerzo residual y la magnitud no son iguales a través de la junta de la soldadura disímil, si esta es muy diferente ahí se generarán esfuerzos internos en la intercrítica zona afectada por el calor (ZAC) generando una falla de servicio. Así también, la diferencia de temperaturas de fusión ya que un metal debe ser fundido y recalentado antes que el otro cuando se sometan a la misma fuente de calor, inclusive la diferencia del potencial electroquímico puede incrementar la susceptibilidad en la ZAC, si estos van más allá de la escala la corrosión puede ser un problema serio.

Proceso de la soldadura disímil

Como se explicó anteriormente los factores metalúrgicos como la solubilidad, la soldabilidad, el calor absorbido y la expansión térmica son las principales consideraciones para esta unión.

Otros factores a considerar serán:

- las tasas de fusión, Así como los dos metales de la unión pueden tener diferentes tasas de expansión térmica, pueden tener diferentes tasas de fusión, lo que daría un problema inmediato entre los dos metales. Sin embargo, siempre que se utilice un proceso de soldadura de alta entrada de

calor, ambos metales deberían fundirse y soldarse lo suficientemente rápido para que esto no sea un problema;

- La corrosión, esta puede ocurrir en el área de transición de los dos metales. Si los dos metales se encuentran en secciones muy diferentes de la escala electroquímica, esto sugiere un alto nivel de susceptibilidad a la corrosión, por ende, es un problema perjudicial para la nueva soldadura;
- Niveles de resistencia diferentes, diferentes niveles de expansión térmica llegan causar tensión residual interna. Sin embargo, es posible que la tensión residual también pueda ser causada por niveles de resistencia diferentes, para ello, se asegura que la resistencia a la tracción del metal de relleno y el metal con el nivel de resistencia más bajo sea lo más similar posible. No podrá encontrar una coincidencia exacta, pero al mantener la distancia entre esas dos figuras lo más pequeña posible, reducirá las posibilidades de que se desgarre la soldadura.

Una vez que se hayan considerado los factores anteriores, puede comenzar el proceso de soldadura. La soldadura de metales disímiles es, en su mayor parte, similar a la soldadura de dos metales iguales. Esto se hace fundiendo físicamente los dos metales hasta que formen una unión fuerte y conectada. Esta fusión de metales se completa usando un alto nivel de calor del rayo láser para causar la fusión.

La complicación con este tipo de soldadura es que al soldar dos metales muy distintos y muy diferentes, no siempre es tan fácil como simplemente fundir las dos partes para formar una unión. como se ha mencionado, los problemas surgen en la zona de transición entre los metales formando compuestos intermetálicos.

Una capa de enmantequillado (buttering layer)¹, frecuentemente se usa entre los dos metales principales y el metal de soldadura para facilitar el proceso de unión

¹ Una variación de la soldadura de superficie en la que el metal de soldadura se deposita en una o más superficies para proporcionar metal de soldadura metalúrgicamente compatible para la posterior finalización de la soldadura. [<https://awo.aws.org › glossary › buttering>]

y ayudar a proporcionar una transición fácil, resolviendo muchos de los factores que se han considerado con anterioridad.

Para que la unión sea exitosa, la nueva junta de formación debe ser tan fuerte como el metal con la resistencia a la tracción más débil, para que sepa que la junta podrá resistir los esfuerzos que enfrenta. El cobre y el acero son otros dos metales que a menudo se sueldan entre sí, pero poseen propiedades diferentes y no son mutuamente solubles. Sin embargo, el níquel es soluble con ambos y se puede usar como capa de enmantequillado, ya sea como una pieza completa de níquel o como depósitos de níquel más pequeños en la superficie del acero.

Posterior a la unión, se considera la tensión residual en las soldaduras de metales causada por la contracción térmica del metal de soldadura y el metal calentado, lo que significa que la distribución de la tensión residual es extremadamente similar entre los dos tipos diferentes de procesos de soldadura de metal.

Los niveles de estrés residual pueden ser buenos o malos, ya que pueden afectar positiva o negativamente la resistencia a la fatiga, la vida útil de la fatiga, la propagación de grietas y la resistencia a factores ambientales como la corrosión. Si es bueno o malo dependerá de los niveles de tensión residual. Por ello, algunas soldaduras se someten a un tratamiento térmico posterior a la soldadura para garantizar que se mantenga la resistencia de los dos metales recién unidos (post calentamiento). Sin embargo, esto puede causar que se forme un nuevo conjunto de tensiones residuales, ya que volverá a calentar los dos metales con niveles de expansión térmica potencialmente diferentes.

Estas tensiones residuales serán:

- Aquellas paralelas a la dirección de la soldadura serán de tensión más alta en el metal que tiene el mayor nivel de expansión, mientras que será compresivo dentro del metal que tiene un nivel más bajo. Habrá una discontinuidad en los niveles de estrés en la unión.

- Habrá tensión en la unión, particularmente en la intersección con la superficie, lo que podría contribuir a la formación de grietas.
- Puede haber una tensión residual transversal localizada ubicada en la superficie cerca de la interfaz.

Se debe señalar que los niveles de tensión residual se aliviarán cuando la soldadura se caliente, como durante el tratamiento térmico posterior a la soldadura, teniendo en cuenta que los niveles de tensión residual podrían ocurrir después de esto.

Otras soluciones, como el granallado, intentan controlar los niveles de estrés residual bombardeando el metal con corrientes de disparos metálicos. El objetivo de un proceso como este es causar niveles de estrés residual beneficiosos para aumentar su vida útil por fatiga. El cambio más pequeño en los niveles de estrés residual puede tener un efecto enorme y potencialmente dañino en sus componentes, es muy importante conocer el estado de estrés residual en todo momento.

Aplicaciones de la soldadura disímil en la industria

La soldadura de metales disímiles se usa en muchas industrias y tiene una variedad de aplicaciones, realizándose satisfactoriamente la unión, pueden soportar un nivel alto de tensión.

Comúnmente utilizados en la industria automotriz y aeroespacial ya que se necesita manejar increíbles presiones que proporcione buenos niveles de seguridad y para unir dos partes del fuselaje de un avión las cuales necesitan grandes durezas para grandes altitudes. Siendo así, desde el año 2000 ha incrementado la producción de vehículos y la unión de diferentes aleaciones de aluminio reducen las emisiones de CO_2 . Lo mismo sucede en la industria aeroespacial con un gran crecimiento utilizando altas aleaciones de aluminio y de aleaciones de titanio, de la unión de estos se tiene una reducción de combustible volviéndose más ligero y

aumentando su rendimiento, también se añade cobre ya que proporciona alta resistencia, ductilidad, alta conductividad y excelente resistencia a la corrosión.

La industria marítima, al igual que la industria aeroespacial y automotriz, también hace un uso intensivo de las aleaciones de aluminio. El uso más común de esto es para la unión de aluminio al casco de los barcos, que originalmente está construido de acero.

En la industria de las baterías y la industria electrónica estrechamente relaciona una con la otra, se valen de la soldadura de diferentes materiales en la producción de baterías y nuevos productos electrónicos, siendo el más notable las baterías de ion-litio debido a que estas utilizan la soldadura laser construyéndose comúnmente a partir de mezclas de cobalto, níquel, litio y manganeso la combinación de estos metales es lo que proporciona el mayor número de beneficios para una batería de ion-litio y no sería posible sin la técnica de soldadura de metales disímiles, por lo cual, lo acerca aún más a la industria automotriz buscando llegar con los autos eléctricos a más mercados.

También la soldadura disímil puede encontrarse en plantas de generación de energía, plantas químicas y de procesamiento de alimentos donde comúnmente se juntan aceros ferríticos de baja aleación con aceros inoxidable austeníticos.

Por último, tiene usos en muchas otras aplicaciones industriales para accesorios, piezas forjadas y tubos, comúnmente encontrados en intercambiadores de calor, reactores de metal líquido y calderas.

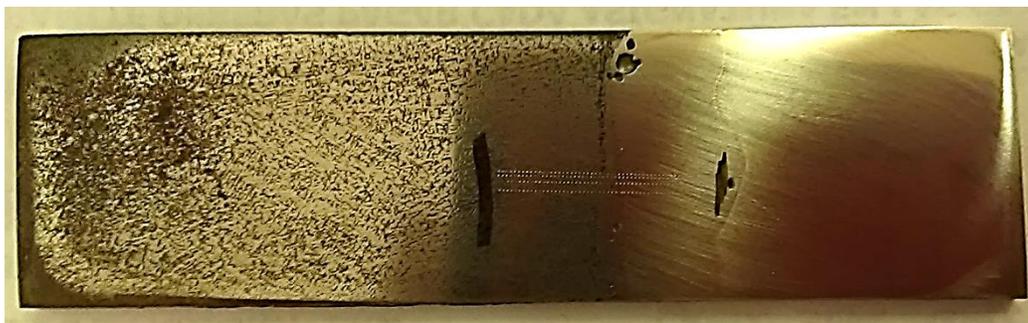
CAPITULO III. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para la preparación de las muestras se utilizaron dos placas; la primera siendo de acero inoxidable AISI 304 y la segunda placa de fundición gris (perlítica). Esta muestra se sometió a pruebas de dureza y se procedió a darle ataque químico para develar su composición microestructural.

Para obtener la probeta de inoxidable se llevó acabo los siguientes pasos:

- El desbaste de las probetas se utilizó una pulidora marca DAP-U con lijas de 320 hasta 2000.
- para obtener un pulido acabado espejo, se utilizó una pulidora marca Leco, utilizando el paño y alúmina (Al_2O_3) de $0.3 \mu m$.
- se le efectuó un electro pulido a la pieza (inoxidable-fundición) a 6 volts con un electrolito de ácido oxálico al 15% en peso.



Superficie de la muestra después del electro pulido.

Ensayos de dureza.

Los estudios de dureza fueron realizados en un durómetro marca Amsler, figura 19 utilizando la escala de 2 kg obteniendo así 50 lecturas con una distancia entre huella de 0.005 pulgadas en las áreas del material base, ZAC y material de aporte, figura 20, para así poder tomar la medida dejada por el Indentador.

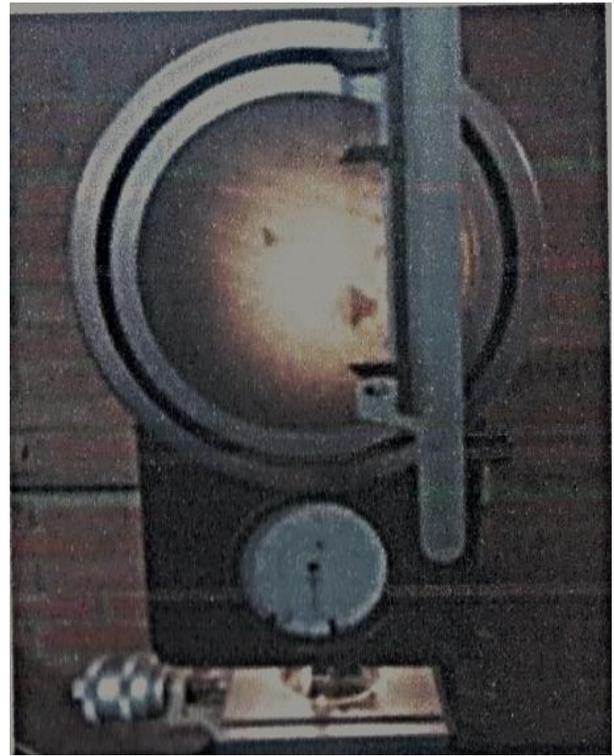
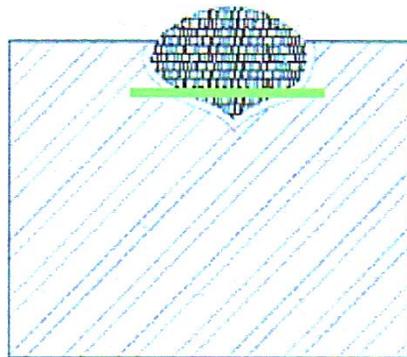


Figura 19: Durómetro Vickers.

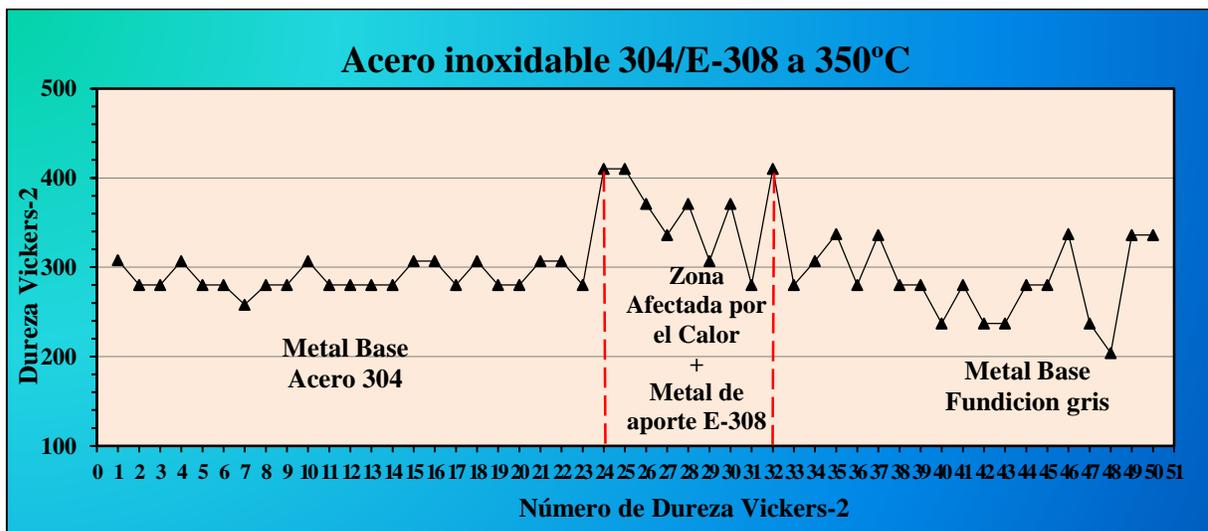


-  Material base
-  ZAC
-  Material de aporte
-  Toma de durezas

Figura 20. Esquema de la toma de durezas.

NÚMERO	DUREZA	NÚMERO	DUREZA
1	307	26	457
2	280	27	336
3	280	28	457
4	307	29	307
5	280	30	371
6	280	31	280
7	258	32	410
8	280	33	280
9	280	34	307
10	307	35	237
11	280	36	280
12	280	37	336
13	280	38	280
14	280	39	280
15	307	40	237
16	307	41	280
17	280	42	237
18	307	43	237
19	280	44	280
20	280	45	280
21	307	46	336
22	307	47	237
23	280	48	204
24	410	49	336
25	410	50	336
TOTAL		15002	

TABLA 16



Gráfica 1

La tabla anterior (TABLA 16) es la representación de cada una de las durezas tomadas en la muestra de soldadura realizada de los dos materiales disimiles, haciendo hincapié, que el presente estudio está dirigido al comportamiento del material de aporte (E-308) y el metal base 304 con precalentamiento y post calentamiento a 350 °C en su zona afectada por el calor y zona de dilución.

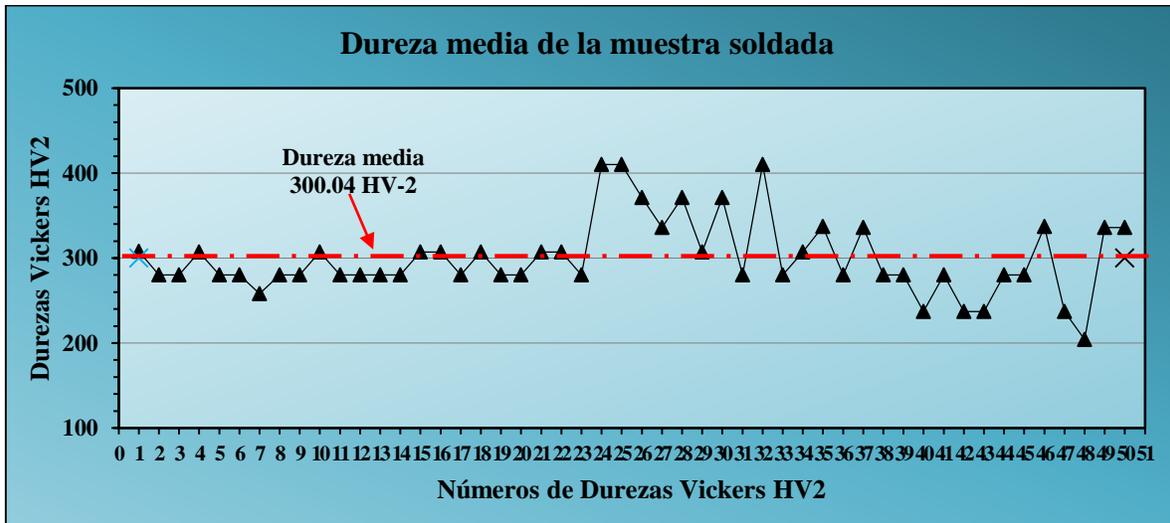
Los resultados de cada una de las lecturas de dureza tomadas (50), están representadas en la gráfica anterior (gráfica 1), y así tener una representación única de cada dureza, en la muestra.

Con los resultados obtenidos del ensayo de dureza de la muestra de acero 304 que fue soldado con un electrodo E-308, y con ayuda de las herramientas de la desviación estándar de la estadística, se obtuvo más datos para el análisis de las durezas obtenidas. En la siguiente tabla.

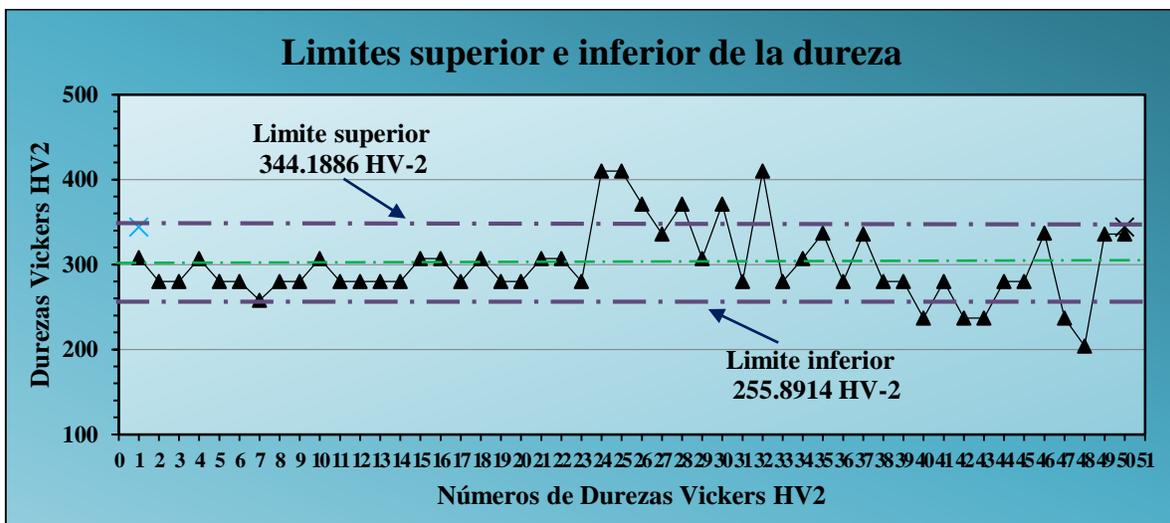
N=	50
$\Sigma x =$	15002
$\bar{x} =$	300.04
S	44.1486
Lim. Superior	344.1886
Lim. Inferior	255.8914

TABLA 17

La determinación de la media con ayuda de la desviación estándar, permite considerar que esa sería la dureza ideal de 300.04 HV-2 en la soldadura de los dos materiales disimiles, en una condición ideal de la muestra en la soldadura, según la gráfica (gráfica 2).

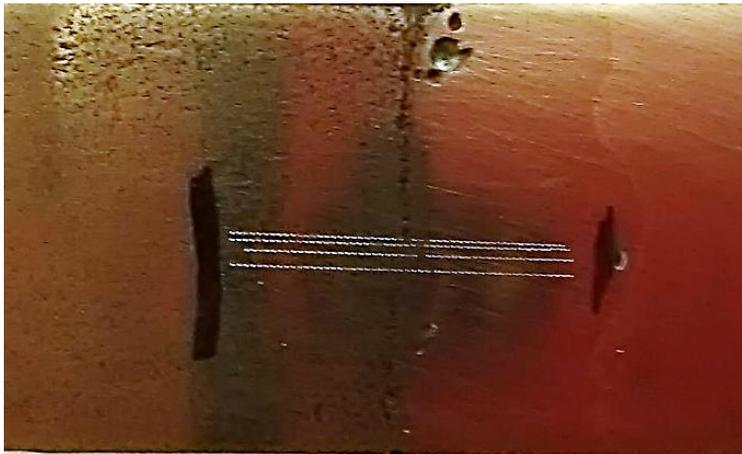


Gráfica 2



Gráfica 3

La grafica (gráfica 3) muestra el límite superior e inferior de las durezas, cuyas lecturas se pueden considerar con un grado de confiabilidad, ya que sus variaciones con respecto a la media se pueden considera como aceptable y cuya aplicación o ensayo de la dureza, se puede considera como bien ejecutadas.



Marcas de las durezas que tomaron de la muestra pasando por la ZAC.

Estudio Metalográfico.

La muestra que se observó fue la que se realizó con el electrodo revestido E-308-16, de 1/8" de diámetro, éste es un electrodo de tipo rutilico y por consiguiente su principal componente de la formulación del revestimiento es óxido de titanio (TiO_2), tiene baja penetración y la varilla es la de un acero inoxidable tipo AISI 308, cuya característica principal, es que al ser depositado es de un acero inoxidable austenítico, esto quiere decir que tiene una microestructura de austenita, esto se debe por los porcentajes de cromo y níquel.

El estudio metalográfico se realizó con un microscopio Olympus a 4 aumentos que fueron: 50X, 400X, 600X y 800X, y cuya observación fue principalmente en la zona afectada por el calor (ZAC) y zona de dilución o liga, para estudiar los fenómenos metalúrgicos que ocurrieron por el efecto de la alta temperatura del arco de soldadura.



Microscopio Olympus y montaje en resina



Objetivos utilizados para obtener los aumentos de 50x, 200x, 600x y 800x.

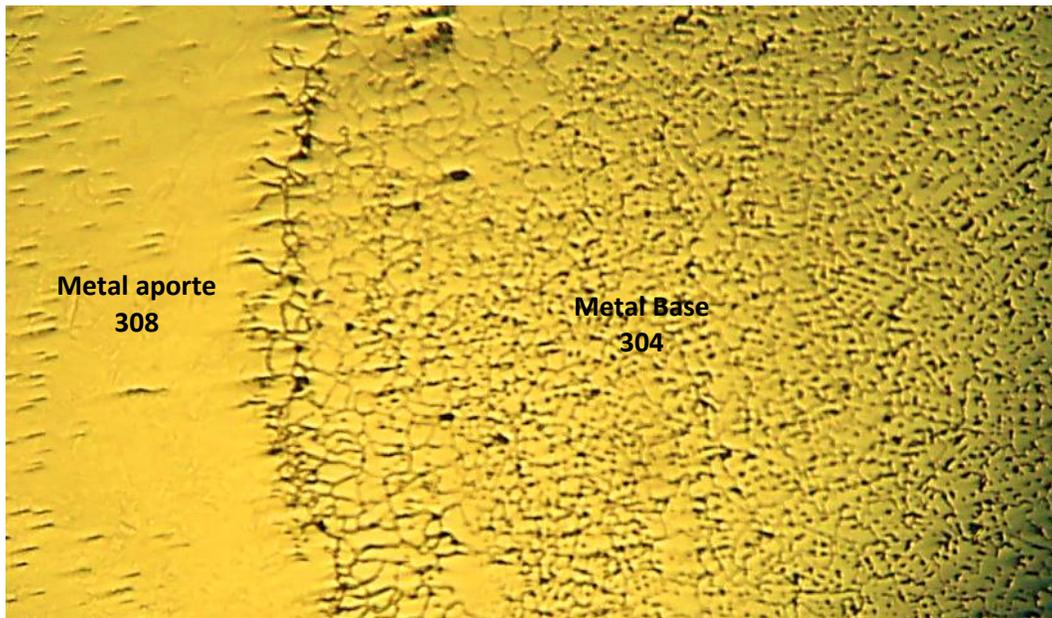
Para la metalografía se tomaron fotografías con una cámara Sony, realizando tomas de las mismas regiones a diferentes aumentos.

Los primeros resultados que se obtuvieron fueron los de la metalografía, a 50X con el microscopio metalográfico.



cámara Sony Cybershot Carl Zeiss de 16.1 megapíxeles y accesorio para montaje en el microscopio.

Aumento a 50X



Fotogr. 1 50X



Fotogr. 2 50X



Fotogr. 3 50X

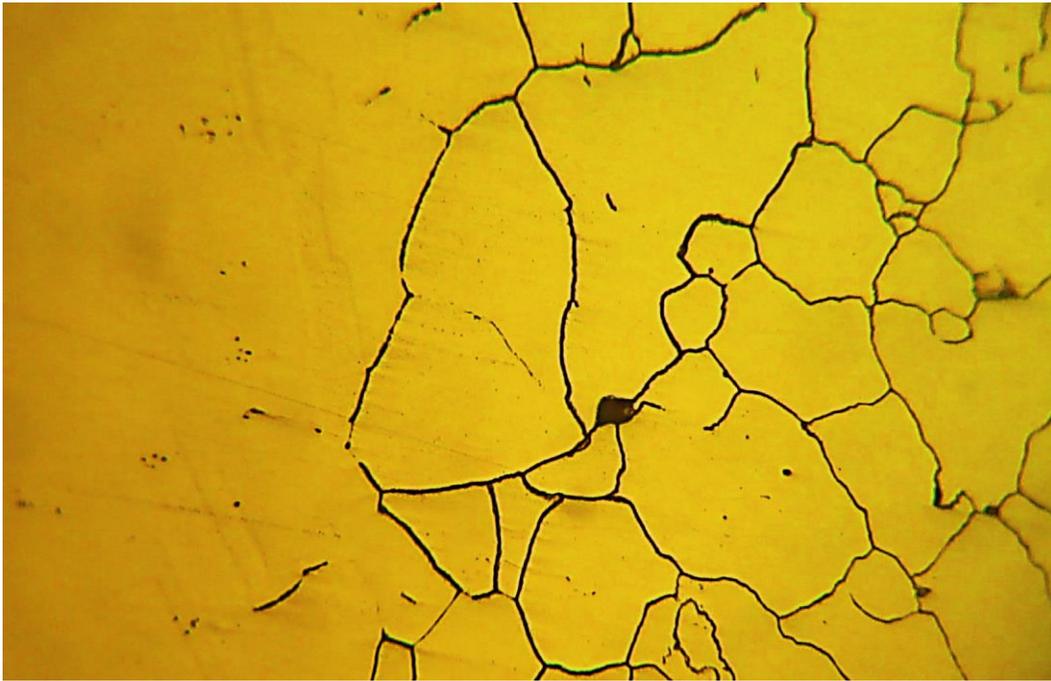


Fotogr. 4 50X

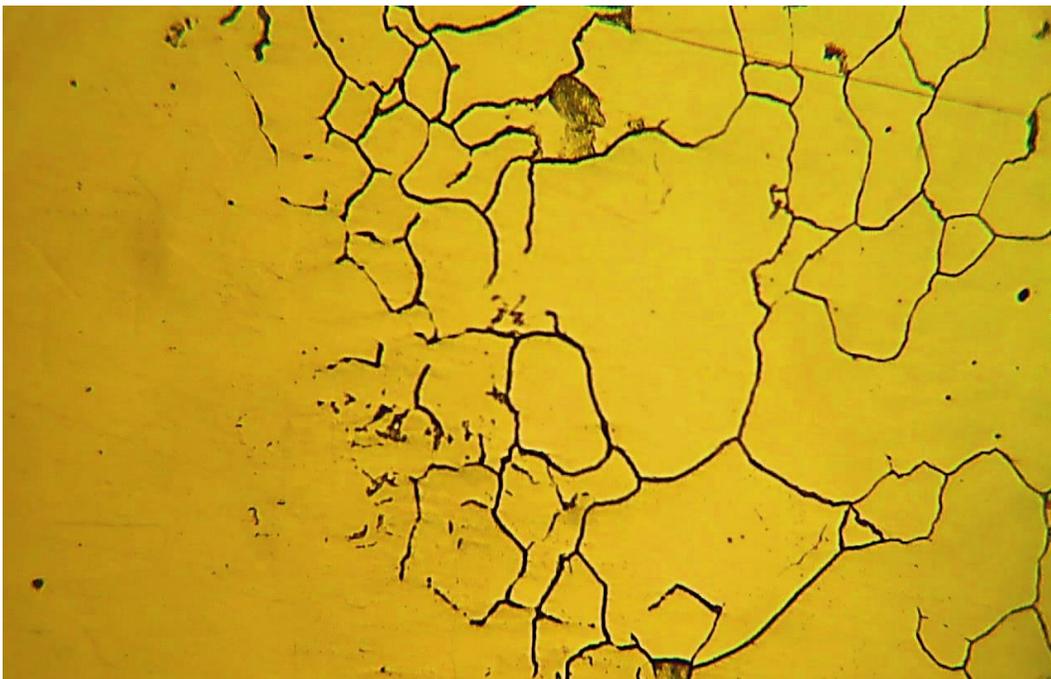
A los 50 aumentos se percibe bien definidos el material de aporte, metal base y la línea de fusión, hay que hacer notar que, a partir de la línea de fusión, existe un crecimiento de grano tanto del metal de aporte como en el material base.

En el metal base existe el crecimiento de cristales que se perciben muy limpios, y posteriormente se cambia la morfología del metal, esa zona es la Zona Afectada por el Calor (ZAC). Se puede considerar que dicha Zona Afectada por el Calor es reducida o de una dimensión pequeña.

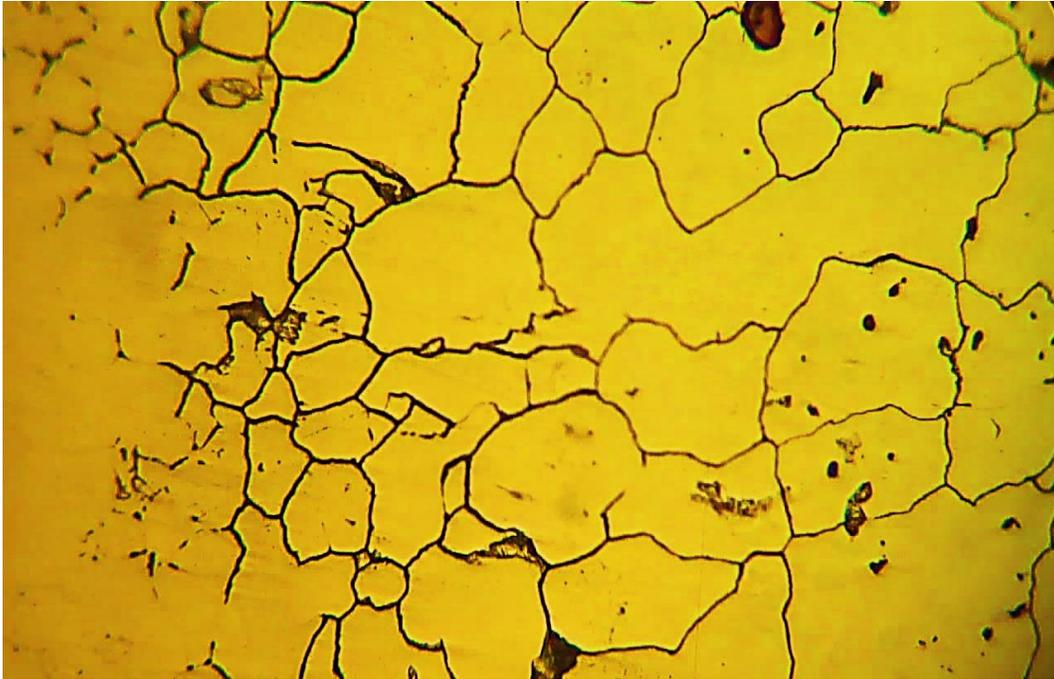
Aumentos a 400X



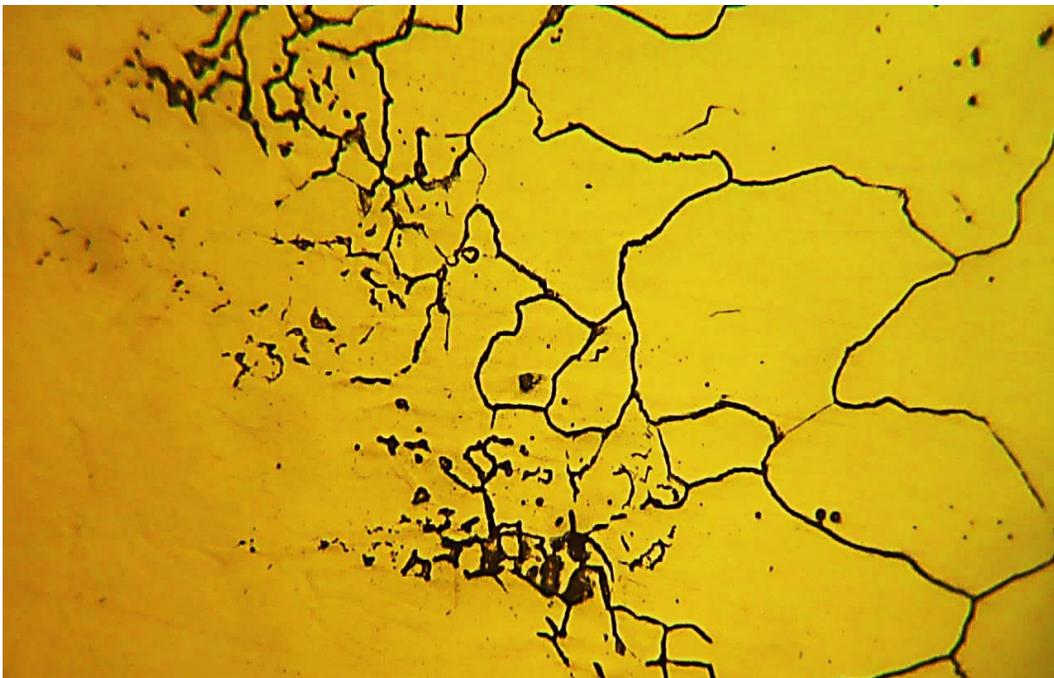
Fotogr. 5 400X



Fotogr. 6 400X



Fotogr. 7 400X

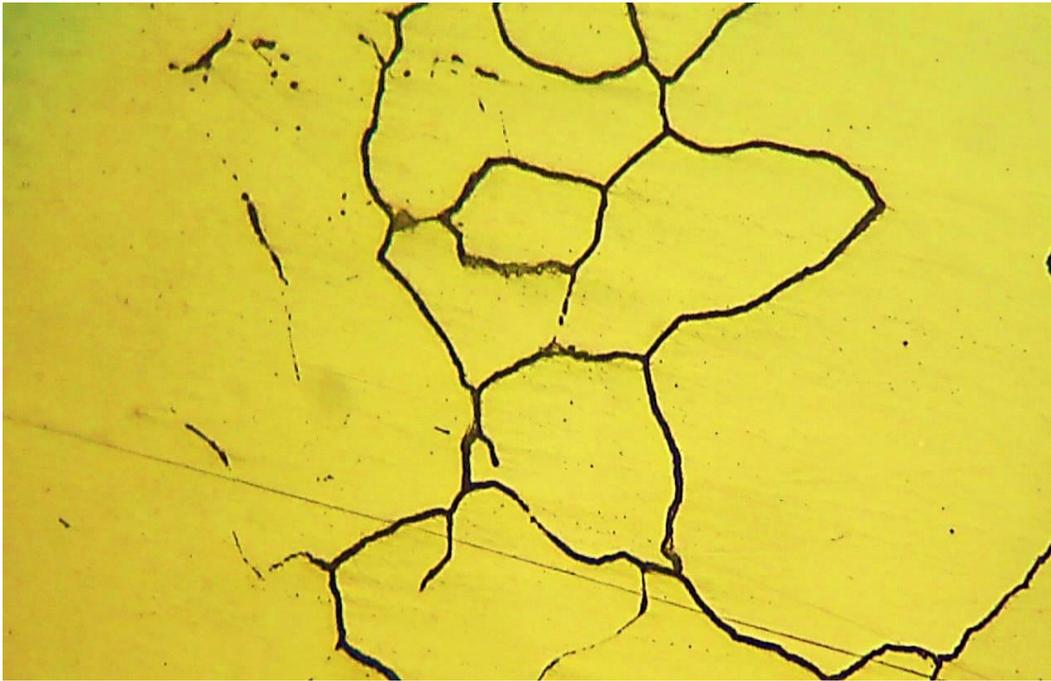


Fotogr. 8 400X

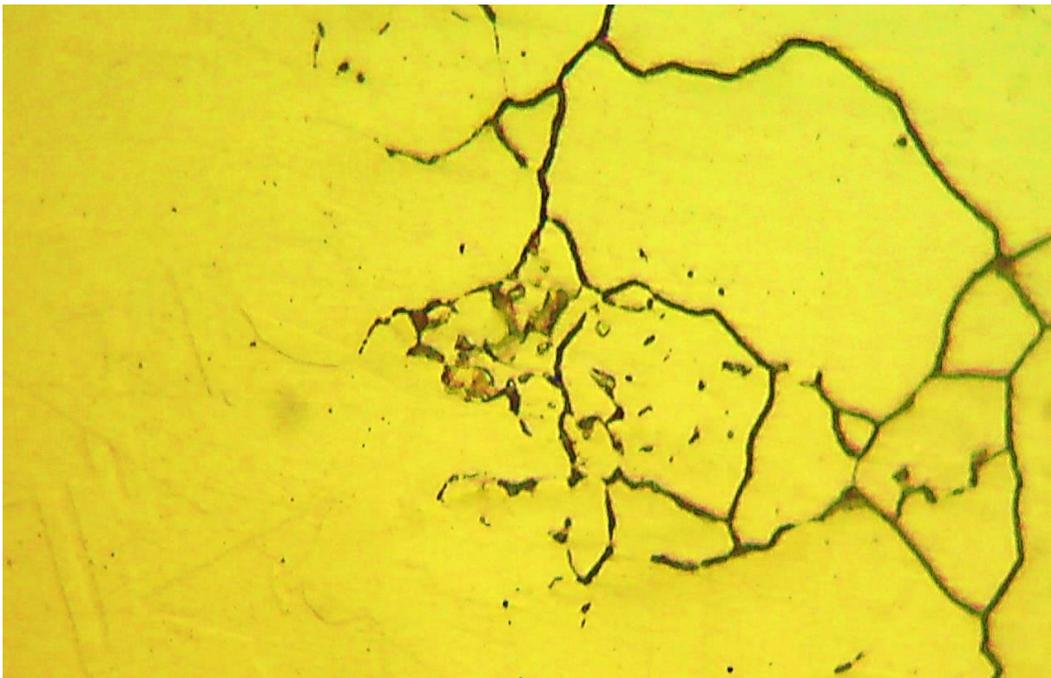
En las fotografías del aumento de 400X, se empieza encontrar la evidencia de la presencia de un precipitado intergranular, el cual se empieza a definir por el ataque electroquímico con ácido oxálico y 6 volts de corriente directa; este precipitado es de una morfología muy fina.

Los cristales de la Zona Afectada por el Calor del acero del metal base 304, son de una apariencia vasta o grande, este crecimiento es provocado por el calor de la soldadura y los tratamientos del procedimiento de soldadura aplicado, sin embargo, existen unos cristales muy finos que se pueden considera que pertenecen al material de electrodo de aporte del acero 308 y entre ellos la línea de fusión.

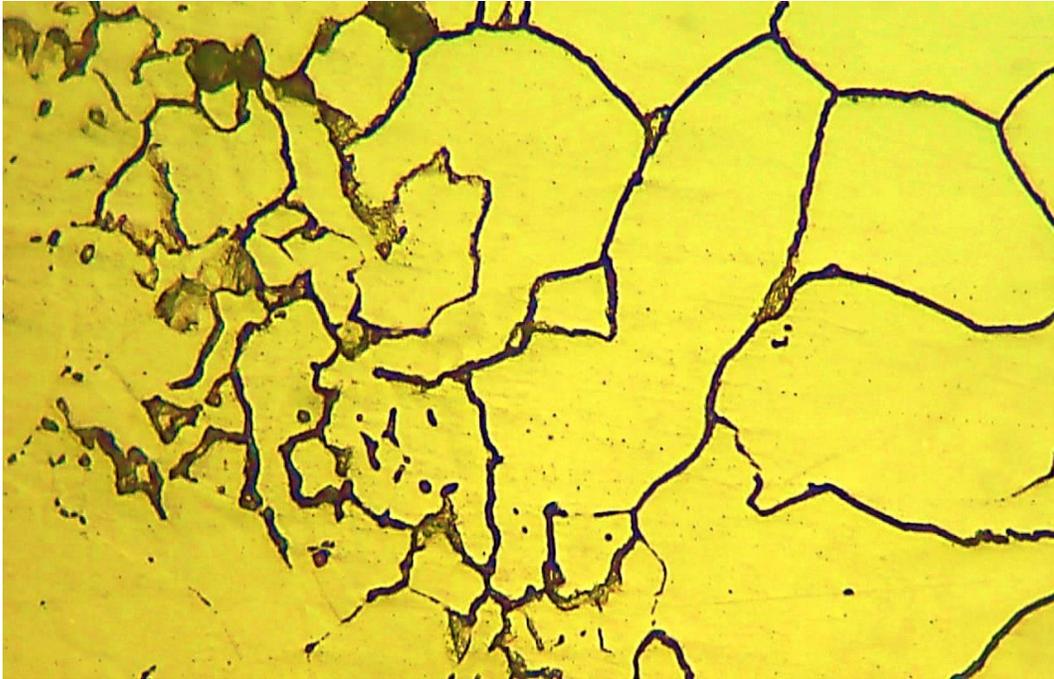
Aumento a 600X



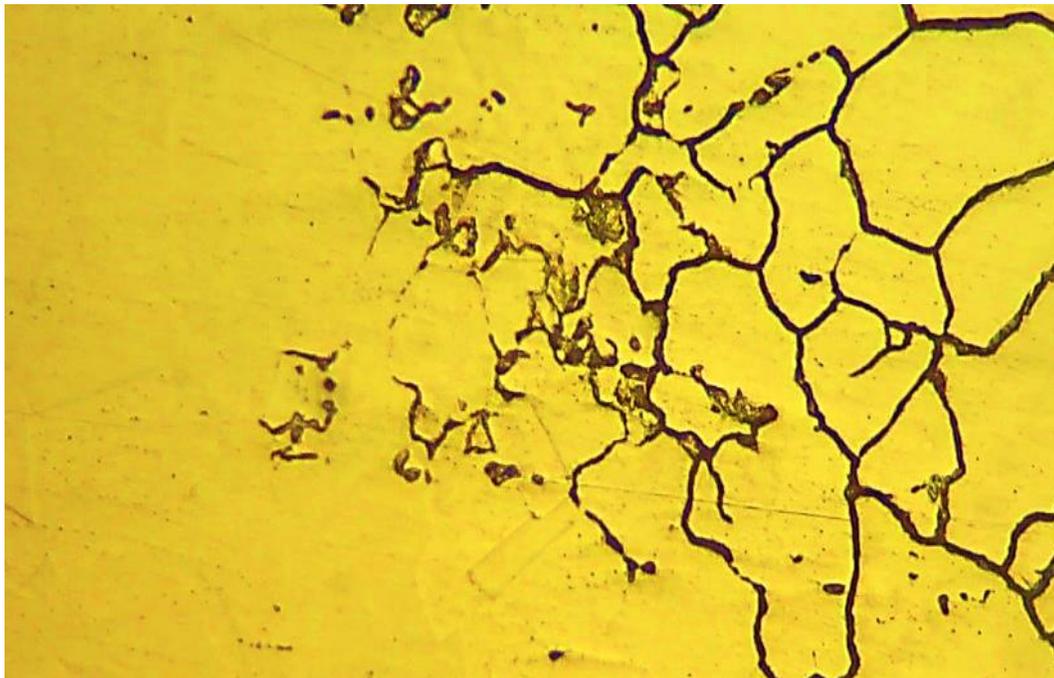
Fotogr. 9 600X



Fotogr. 10 600X



Fotogr. 11 600X

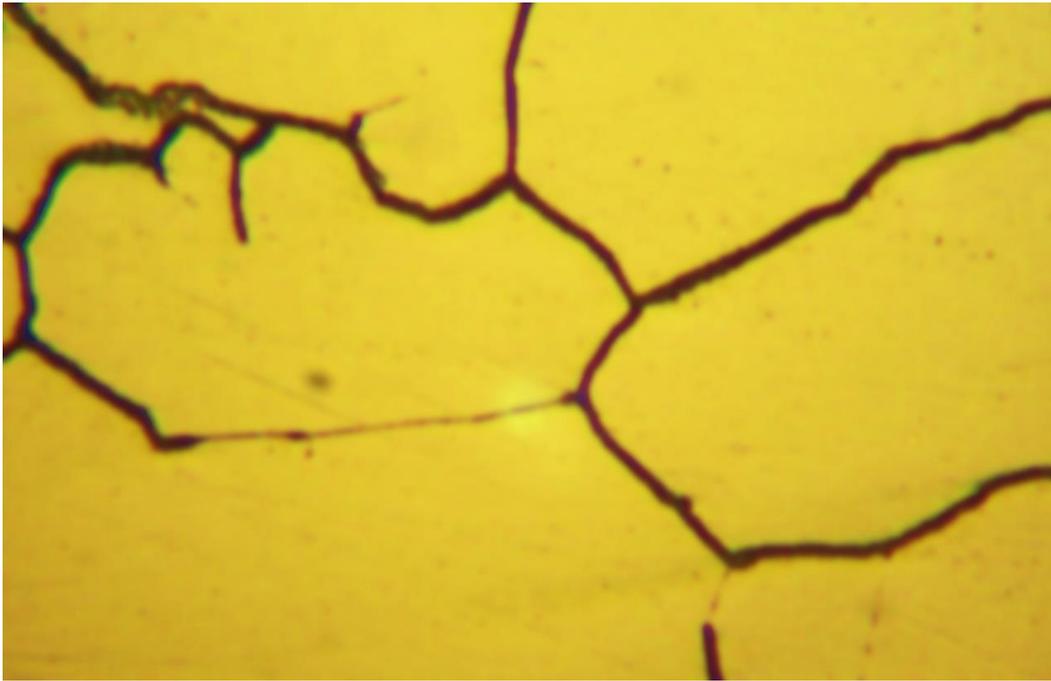


Fotogr. 12 600X

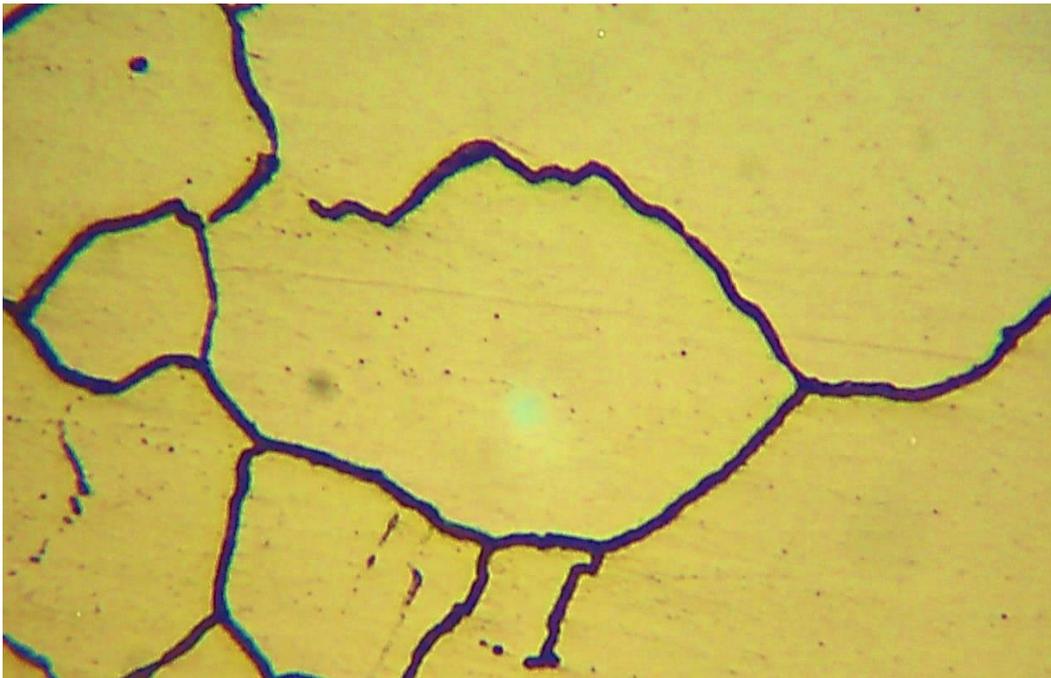
En las fotografías tomadas a 600X, se empieza a confirmar la presencia del precipitado intergranular, que se empezó a observar a 400X, el cual se definió por el ataque electroquímico con ácido oxálico y 6 volts de corriente directa; este precipitado es de una morfología muy fina y rodea todos los cristales vastos de austenita del material base de acero 304, en la Zona Afectada por el Calor (ZAC).

En el material de aporte se alcanza a distinguir la presencia de maclas, tenuemente. En las fotografías 10,11 y 12 aparece también una estructura bandeada que se puede suponer que son cristales extremadamente pequeños de posible perlita.

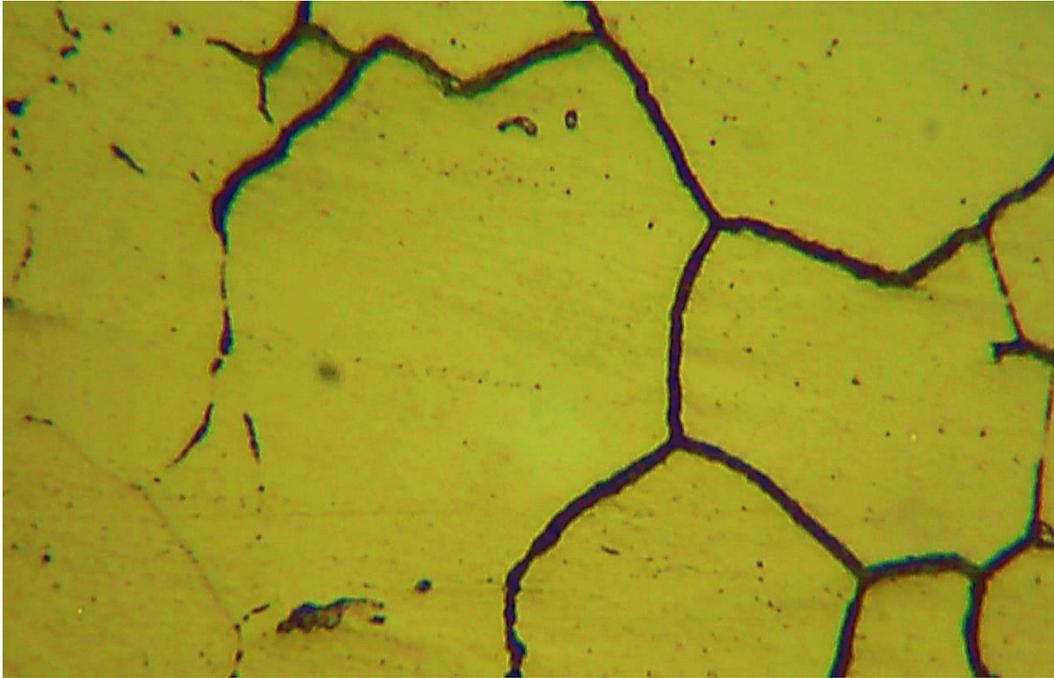
Aumento a 800X



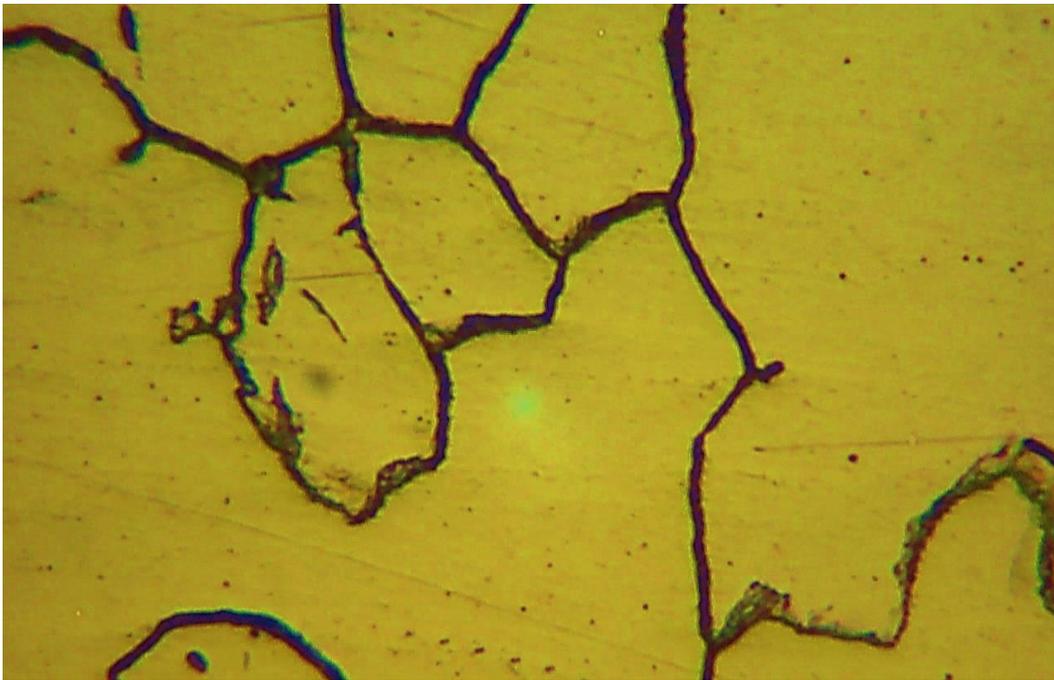
Fotogr. 13 800X



Fotogr. 14 800X



Fotogr. 15 800X



Fotogr. 16 800X

En las fotografías a 800X de aumento ya se distingue la presencia de la precipitación de una fase con una morfología muy fina, y se puede presuponer que son de ferrita delta, ya que en estos aceros la presencia de ferrita alfa es muy poco probable que se presente.

Esta suposición se puede pensar que es por el procedimiento de soldadura de pre y post calentamiento, así como la entra violenta de temperatura a los materiales que es provocada por el arco eléctrico de la soldadura y el fenómeno de alta temperatura generado por el mismo proceso.

Discusión de Resultados.

Las durezas de toda la muestra presentaron tres grupos cuyas características fueron diferentes, un primer grupo que comprende de la 1 a la 23, las cuales corresponde a las durezas tomadas al acero inoxidable 304 con variaciones de 280 a 307 HV-2, con lo que muestra una homogeneidad en cuanto a las lecturas y se puede calcular su media que es 290 HV-2. El segundo grupo de durezas son la que son de 24 a la 32, las cuales corresponde a las durezas tomadas de la ZAC y metal de aporte con variaciones de 280 a 410 HV-2, cuya media es 382 HV-2 y el tercer grupo de durezas corresponde a la fundición gris que son de la 33 a la 50, con variaciones de 280 a 336 HV-2, c la cual presenta mayor heterogeneidad y cuya media es de 277.8 HV-2.

El grupo de durezas que se acerca más a la dureza ideal del experimento o sea a la media de todas las durezas es las que se obtuvieron en el acero inoxidable 304 y la que tuvo las mayores variaciones a la dureza ideal fue la del grupo de la ZAC y zona de dilución.

Por otro lado, el grupo que tuvo la mayor cantidad de durezas fuera de la zona de confiabilidad fue la de la ZAC y material de aporte y el grupo que no tuvo ninguna fue el del acero inoxidable 304.

Homogeneidad de la muestra se confirma con las pocas durezas (4) que se salen de las durezas máximas y mínimas según el cálculo de la desviación estándar.

Según la dureza no fue posible determinar las zonas de la ZAC y el metal de aporte y poderlas por medio de la toma de dureza, permite entender la confiabilidad de los resultados obtenidos y así comprender si los resultados se pueden tener una confiabilidad de ellos.

La metalografía muestra la presencia de dos fases, austenita y ferrita, una constituida por los granos crecidos del material base, otros cristales pequeños que se localizan en la línea de fusión.

Estos dos grupos de cristales se forman de modo diferente unos (los crecidos o vastos) son del material base, estos nunca pasaron del estado sólido al líquido por el fenómeno de la temperatura del arco eléctrico del proceso de fusión y con el proceso de precalentamiento y post calentamiento favorecieron la movilidad atómica y por consiguiente pudieron crecer como se demuestra en las fotografías de la metalografía.

El siguiente grupo de cristales pequeños, estos son del material de aporte, material que fue fundido, y que pudieron nuclear y coalescer, pero no crecer.

Entre los cristales vastos del material base y los cristales pequeños del material de aporte, se puede considera una línea imaginaria que es la línea de fusión.

Se puede considerar que el precipitado que se forma y que rodea los cristales vastos del metal base se formaron por la difusión y la formación de la fase ferrita delta, la cual se forma a muy alta temperatura, pero debe tener un tiempo de difusión.

CONCLUSIONES.

Analizando los ensayos de dureza y metalográficos realizados, se concluye que propiedades metalográficas y de dureza sufren cambios significativos.

El uso de la estadística como herramienta en el ensayo de dureza permitió determinar con exactitud sí el ensayo es confiable y bien realizado, por consiguiente, se puede concluir que la dureza en el acero inoxidable 304, junto con la ZAC y material de aporte muestran una homogeneidad, cada una en su zona.

El ensayo de dureza no tuvo la capacidad para definir entre las zonas de la soldadura del metal base; aporte y Zona Afectada por el Calor (ZAC), por su homogeneidad.

El estudio metalográfico permitió definir que el precalentamiento y post calentamiento tiene una gran influencia en la formación de las estructuras finales, ya que permite el fenómeno de difusión.

La concentración de los elementos aleantes permiten que con la temperatura y tiempo se pueda formar la false ferrita delta, en el contorno de los cristales de austenita.

En esta mezcla de fases se puede concluir, que la resistencia del metal en la zona intercrystalina va a ser menor que la resistencia de los cristales de austenita de la matriz del metal, a que todo el metal fuera de austenita en la matriz del acero en la ZAC y zona de dilución o liga.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) “ASM Speciality Handbook, Stainless Steel”, ASM International, 1994.
- 2) Peckner, Donald, Bernstein, I.M. “Handbook of stainless steels”, First edition, 1977.
- 3) Doyle Lawrence E. “Procesos de materiales de manufactura para ingenieros” Tercera edición, Editorial Prentice Hall, México, 1998.
- 4) Estudiantes metalografía (26 julio, 2012), “7. Acero Inoxidables”, METALOGRAFÍA - UNIVERSIDAD TECNÓLOGICA DE PEREIRA, WordPress, recuperado de:
[\[http://blog.utp.edu.co/metalografia/7-aceros-inoxidables/#parte8\]](http://blog.utp.edu.co/metalografia/7-aceros-inoxidables/#parte8)
- 5) “Metals handbook vol. 6: welding, brazing and soldering”, ASM International, Tenth edition, 1993.
- 6) Angela Lázaro Martín (09 abril, 2012), “PROPIEDADES Y SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS INOXIDABLES ”, LINCOLN electric, PDF, recuperado de:
[\[https://www.solysol.com.es/data/documents/Soldabilidad=20Inox.pdf\]](https://www.solysol.com.es/data/documents/Soldabilidad=20Inox.pdf)
- 7) Groover, Mikell P. “Fundamentos de manufactura moderna”, tercera edición, McGraw Hill, 2007.
- 8) “AISI Type 304 Stainless Steel”, Aero Specification Materials Inc. Matweb, recuperado de:
[\[http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=mq304a\]](http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=mq304a)
- 9) “Austenitische Rostfreier stähle: AISI 304 – 304L” (2012), Ravani Acciai, AND EMILI, recuperado de:
[\[http://www.ravaniacciai.it/aisi_304_304l/listtables_de_95.aspx\]](http://www.ravaniacciai.it/aisi_304_304l/listtables_de_95.aspx)
- 10) José Luddey Marulanda, Victor Manuel Burbano y Jaime Andrés Peláez (23 Noviembre, 2013) “Análisis de soldabilidad de aceros inoxidables con aceros de medio y bajo carbono”, Universidad Tecnológica de Pereira, PDF, recuperado de:
[\[http://www.scielo.org.co/pdf/rfing/v22n35/v22n35a08.pdf\]](http://www.scielo.org.co/pdf/rfing/v22n35/v22n35a08.pdf)
- 11) Phillips, David H. “Welding engineering an introduction”, WILEY, 2016.
- 12) S.H Avner, “Introducción a la metalurgia física”, Second edition, Mc Graw Hill, EUA, 1988.
- 13) “Soldabilidad y corrosión de aceros inoxidables” INDISA.
- 14) Pedro Pablo Torres Medina, (09 febrero, 2007), “Soldabilidad del acero inoxidable austenítico”, Dailnet-soldabilidad.
- 15) FONTANA M.G GREENE N. Corrosion Engineering, Second Edition, Mc Graw Hill, Book company NY-1969.

- 16) “soldabilidad en aceros inoxidable y aceros disimiles”, (Mayo, 2007), Ricaurte Ospina López, Héctor Aguirre Corrales y Hernando Parral, Universidad Tecnológica de Pereira.
- 17) Richard Little, “Welding and Welding Technology”, McGraw, 1973.
- 18) Aceros Inoxidables, aceros refractarios. LColombier y J. Hochmann. Editorial Umno, 1968.
- 19) “Conozca al inoxidable”(2019), IMINOX, PDF, recuperado de: [\[https://iminox.org.mx/wp-content/uploads/2019/03/ABC_LIBRO-A.pdf\]](https://iminox.org.mx/wp-content/uploads/2019/03/ABC_LIBRO-A.pdf)
- 20) Ing. Sergio G. Laufganf (07 julio, 2003), “Aceros inoxidables”, TERMO SOLDEX S.A. PDF, recuperado de: [\[http://materias.fi.uba.ar/6713/ACEROS_INOXIDABLES.pdf\]](http://materias.fi.uba.ar/6713/ACEROS_INOXIDABLES.pdf)
- 21) “Influencia del tamaño del grano en las propiedades mecánicas de los aceros inoxidables austeníticos” (2005) M.A. Martínez, J. Ordieres, R. Sánchez.
- 22) Inchaurreza Zavala Adrian, “Aceros Inoxidables y resistentes al calor”, primera edición, 1981, Edit. Limusa.
- 23) Dr. Albert Sadek (15 diciembre, 2015), “Dissimilar Materials Weldability Concepts”, EWI, PDF, recuperado de: [\[https://ewi.org/wp-content/uploads/2016/01/Dissimilar-Metal-Weldability-Concepts_Alber-Sadek.pdf\]](https://ewi.org/wp-content/uploads/2016/01/Dissimilar-Metal-Weldability-Concepts_Alber-Sadek.pdf)
- 24) José Luddey Marulanda, Saúl Isaac Castañeda, Francisco Javier Perez (Junio, 2013) “estudio de microestructura y composición de la oxidación en vapor a 700 y 750 °C de los aceros austeníticos aisi 304, 316 y 317”, Fac. Ing. Univ. Antioquia, PDF recuperado de: [\[http://www.scielo.org.co/pdf/rfiua/n67/n67a09.pdf\]](http://www.scielo.org.co/pdf/rfiua/n67/n67a09.pdf)
- 25) Richard E. Avery (May, 1991), “guide lines for welding dissimilar metals”, NiDI, PDF, recuperado de: [\[https://www.nickelinstitute.org/media/1691/guidelinesforweldingdissimilarmetals_14018_.pdf\]](https://www.nickelinstitute.org/media/1691/guidelinesforweldingdissimilarmetals_14018_.pdf)
- 26) “Dissimilar Metal Welding”, SPI Lasers, recuperado de: [\[https://www.spilasers.com/application-welding/dissimilar-metal-welding/\]](https://www.spilasers.com/application-welding/dissimilar-metal-welding/)
- 27) “Industrial Applications for Dissimilar Metal Welding”, SPI Lasers, recuperado de: [\[https://www.spilasers.com/application-welding/industrial-applications-dissimilar-metal-welding/\]](https://www.spilasers.com/application-welding/industrial-applications-dissimilar-metal-welding/)