

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA



**ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA CORROSION Y
MICROESTRUCTURA EN LA SOLDADURA DEL ACERO
DUPLEX 2205**

TESIS

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECANICO**

JUAN CARLOS LAZARO GIRALDO

PROMOCION 2005-II

LIMA-PERU

2010

INDICE

PRÓLOGO	01
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	04
1.1 Antecedentes	04
1.2 Objetivos	08
1.3 Limitaciones del Trabajo	09
CAPÍTULO II: EL ACERO INOXIDABLE DÚPLEX	10
2.1 Composición Química de los Aceros Inoxidables Dúplex	12
2.2 Metalurgia de los Aceros Inoxidables Dúplex	16
2.2.1 Cambios Microestructurales por Encima de 1050°C	21
2.2.2 Cambios Microestructurales entre 1050°C y 600°C	23
2.2.3 Cambios Microestructurales por debajo de 600°C	26
2.3 Propiedades de los Aceros Inoxidables dúplex	27
2.3.1 Resistencia a la corrosión por picaduras	27
2.3.2 Resistencia a la Tracción	28
2.3.3 Resistencia al Impacto	29
2.4 Soldabilidad de los Aceros Inoxidables dúplex	30
2.4.1 Metal de Aporte enriquecido en Níquel	32
2.4.2 Control de la generación de calor	32
2.5 Aplicación industrial de los aceros inoxidables dúplex	34

CAPÍTULO III: PROCESO DE SOLDADURA	40
3.1 Proceso Gtaw	42
3.1.1 Características del Proceso	44
3.1.2 Principales Parámetros de Soldeo	44
CAPITULO IV: GASES DE PROTECCION	47
4.1 Factores que afectan la elección del Gas	48
4.2 Propiedades de los Gases	49
4.2.1 Energía de Ionización	49
4.2.2 Conductividad Térmica	49
4.2.3 Disociación	50
4.2.4 Reactividad	51
4.2.5 Densidad	51
4.3 Argón	52
4.4 Nitrógeno	53
CAPITULO V: CORROSIÓN EN ACEROS INOXIDABLES	54
5.1 Corrosión por Picaduras	55
5.1.1 Efecto de la Composición Química	58
5.1.2 Efecto de la Microestructura	62
5.1.3 Evaluación de la Resistencia a la Corrosión por Picaduras	62
CAPITULO VI: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	64
6.1 Material Objeto del Estudio	64
6.2 Procedimiento de Soldadura	65
6.3 Preparación y Proceso de Soldeo	66
6.4 Procedimiento de Corte para las muestras.	73

6.5	Procedimiento Metalográfico	74
6.6	Ensayos de Corrosión por Picaduras	78
6.7	Ensayos de Dureza	83
CAPITULO VII: RESULTADOS Y ANALISIS		84
7.1	Resultados Macrografía	84
7.2	Resultado Micrografía	85
7.3	Resultados de Ensayo De Dureza	89
7.4	Resultados del Ensayo de Corrosión	91
CONCLUSIONES		96
RECOMENDACIONES		97
BIBLIOGRAFÍA		98
ANEXOS		

PROLOGO

Los aceros inoxidable dúplex son aleaciones que tienen una microestructura de ferrita y austerita (casi 50% de cada fase). Estos aceros no se pueden temprar y son magnéticos. Estas aleaciones tienen una gran resistencia a la corrosión y a la vez una gran resistencia mecánica, esto debido a la proporción de sus fases.

En el primer capítulo se habla en forma breve del acero inoxidable, su importancia, antecedentes y objetivos de este trabajo.

En el segundo capítulo se habla del acero inoxidable dúplex y sus características principales.

El tercer capítulo trata sobre el proceso de soldadura y en específico sobre el proceso GTAW y sus principales características.

El cuarto capítulo trata sobre los gases de protección y sus propiedades, en esta parte se ve cómo seleccionar un gas para los procesos de soldadura.

El quinto capítulo trata sobre el proceso de corrosión, corrosión por picaduras, sus características y como se da en los aceros inoxidables.

En el sexto capítulo se habla de los procedimientos realizados para efectuar el estudio del material.

En el séptimo capítulo se habla de los resultados obtenidos en los ensayos realizados en el laboratorio.

Gracias de manera muy especial a mis padres quienes siempre estuvieron allí cuando más los necesitaba, gracias a mi hermano por apoyarme y aconsejarme, gracias a los técnicos del laboratorio cuatro de la UNI, y gracias a los ingenieros y técnicos del laboratorio de materiales de la PUCP.

PLANTEAMIENTO DEL TEMA

Sin duda el acero hoy en día juega un papel muy importante en la vida del hombre, sabemos que existe una gran variedad de estos, pero los que sin duda son unos de los más importantes son los aceros inoxidable, por su buena resistencia a la corrosión, la cual la hace idónea para fabricar los distintos utensilios que el hombre emplea en su vida cotidiana, pero también son muy empleados en ambientes que favorecen la degradación de los materiales bajo el mecanismo conocido como corrosión.

En la actualidad existe una gran variedad de aceros inoxidable, entre ellos tenemos a los aceros inoxidable austeníticos que tienen una gran tenacidad y buena resistencia a la corrosión, los ferríticos que tienen una gran resistencia mecánica y ductilidad pero no muy buena resistencia a la corrosión, los martensíticos que tienen una gran dureza y resistencia mecánica pero al igual que los ferríticos pésima resistencia a la corrosión, los aceros inoxidable dúplex los cuales tienen una gran resistencia a la corrosión y a la vez una gran resistencia mecánica, estos últimos están desplazando a los aceros inoxidable austeníticos en diversas situaciones tales como en ambientes que contienen cloruros, en medicina como implantes, estructuras por su alta

resistencia disminuyendo así su peso. Es así que estos aceros dúplex vienen dando una gran alternativa a la industria.

IMPORTANCIA DEL TEMA

Como sabemos un gran problema al que se debe enfrentar la industria es el que cada día los materiales empleados para su infraestructura se ven afectados por diferentes medios, uno de los más perjudiciales es la corrosión la cual genera grandes pérdidas, ya que los materiales pierden parte de su peso ya sea en forma localizada o en forma homogénea, de cualquier forma se reduce el espesor del material dando lugar a una menor sección que resista los esfuerzos de trabajo, por esta razón buscar un material que resista los ambientes más bruscos, tales como los que contienen cloruros, es vital para evitar cambios de piezas corroídas que conllevan a gastos de reparación, gastos en materiales nuevos, gastos de flujo cesante y a veces de pérdidas humanas. Hoy en día un material muy usado en los países industrializados son los aceros inoxidable dúplex los cuales son muy resistentes a los medios que contienen cloruros, su uso se da en la fabricación de tanques a presión, de estructuras y otros, a través de procesos de soldadura. Para esto se desarrollan diversos procedimientos de soldadura los cuales pueden ser de forma decisiva para que el material soldado sea resistente a la corrosión.

CAPITULO I

INTRODUCCION

1.1 ANTECEDENTES

Los aceros inoxidable se inventaron antes de la primera guerra mundial. Inicialmente se emplearon aleaciones Fe-Cr, Fe-Cr-Ni, los cuales dieron lugar a los primeros aceros inoxidable ferríticos, austeníticos y martensíticos. En 1922 se empieza a aprovechar el efecto favorable del Mo y el Cu sobre la resistencia a la corrosión localizada y en 1928, se descubría que, reduciendo el contenido de carbono en el acero inoxidable era posible disminuir significativamente la susceptibilidad a la corrosión intergranular en estos materiales. Apenas dos años más tarde, aparecían los primeros aceros inoxidable estabilizados con Ti, V, y Nb. En la década de los 30 los aceros inoxidable dúplex se originan como resultados de un “gran error”, en Francia la compañía J. Holtzer estaba produciendo acero inoxidable austenítico del tipo AISI 316 (18%Cr-11%Ni-2%Mo) cuando, en los ensayos de laboratorio, se observó que ciertas probetas del supuesto acero resistían perfectamente a la corrosión intergranular, a pesar de haber sido sensibilizadas. Posteriormente se constató que estas probetas eran magnéticas y un análisis de la composición química reveló que se había desarrollado accidentalmente una aleación con 20%Cr, 8%Ni, 2.5%Mo que contenía una proporción apreciable

de ferrita. Este nuevo material no era sensible a la corrosión intergranular, debido a la formación discontinua de carburos en su matriz ferrítico austenítica [14].

En 1937 se patentó una aleación similar pero conteniendo adicionalmente Cu, para mejorar su resistencia a la corrosión en medios más agresivos

Gracias al desarrollo de la tecnología, de los procesos de fusión y afino, se llegó a controlar en forma más precisa el contenido de S, P, C, O₂, reduciendo sus concentraciones en los aceros inoxidable a niveles muy bajos.

El gran salto en los procesos de fabricación, empleando nuevas técnicas de afino de los aceros, en la década de los 70, permitieron la producción más económica de los aceros inoxidable y la fabricación de nuevas aleaciones con mayores contenidos de Cr y Mo, a la vez que hicieron posible el uso de N como el elemento de aleación, que revolucionaría la tecnología de los aceros inoxidable y la fabricación de nuevos aceros. En la actualidad existen diversos tipos de aceros inoxidable los cuales pueden ser ferríticos, austeníticos, martensíticos, dúplex y otros. El acero dúplex presenta una estructura mixta y consecuentemente sus propiedades son una combinación de ambas estructuras (austenítico y ferrítico).

A partir de 1970 se empezaron a desarrollar los aceros inoxidable Dúplex. Estos aceros tienen mayor resistencia a la corrosión y mayor resistencia mecánica que los desarrollados en sus inicios y a partir de ese momento representan una buena alternativa como material estructural.

En los últimos años la industria viene mostrando un aumento en el interés por el empleo de los aceros inoxidable dúplex, los cuales reúnen una excelente combinación de propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión, que los convierte en una buena alternativa desde el punto de vista técnico y económico, frente a otros materiales como los aceros inoxidable austeníticos de alta aleación (súper austeníticos) y a las súper aleaciones.

En resumen, los aceros inoxidable son aleaciones complejas en las que intervienen un buen número de elementos químicos unos básicos C, Fe y Cr con un mínimo de 11% de este último y otros añadidos como Ni, Mo, Ti, Nb, N y otros con el objeto de alcanzar unas estructuras y propiedades determinadas. El agregado de estos elementos de la aleación permite formar un amplio conjunto de materiales, conocidos como la familia de los aceros inoxidable. Entre los elementos de aleación, dos se destacan: El cromo, elemento presente en todos los aceros inoxidable por su papel en la resistencia a la corrosión y el níquel por la mejoría en las propiedades mecánicas [2].

La siguiente es una visión panorámica de la familia de los aceros inoxidable.

Austeníticos.- Son no magnéticos en estado de recocido, tratamiento de solubilización, tienen una estructura cúbica centrada en las caras, estructura austenítica y presentan excelentes propiedades en la tenacidad, ductilidad, resistencia a la corrosión y soldabilidad. Son los más conocidos y utilizados. No pueden endurecerse por tratamiento térmico, por ejemplo temple, sino

únicamente por deformación en frío o en caliente, tienen una gran estabilidad estructural.

Los elementos básicos de aleación son: $C \leq 0.15\%$, Cr de 16 – 27%, Ni de 8 – 31%. Otros elementos son: Mo de 0 – 7%, Mn, Si, P, S, Ti, Nb, Cu, N, W, Al, V y B (añadidos o residuales). Algunos de estos aceros son: AISI 304, AISI 316.

Ferríticos.- Son magnéticos, tienen una estructura cúbica centrada en el cuerpo, estructura ferrítica y presentan una buena o excelente resistencia a la corrosión, función de su contenido de cromo, pero unas propiedades moderadas o mediocres de tenacidad, ductilidad y soldabilidad. No se endurecen por tratamiento térmico, por ejemplo temple, pero si un poco por deformación en frío o en caliente.

Los elementos básicos de aleación son: C de 0.01 – 0.35%, Cr de 16 – 28%
Otros elementos son: Mn, Si, P, S, Mo, Ti, Nb, Cu (añadidos o residuales).
Alguno de estos aceros son: AISI 405, AISI 405.

Martensíticos.- Son magnéticos, tienen una estructura Hexagonal compacta con fuerte precipitación de carburos de cromo y presentan unas propiedades mediocres de tenacidad, ductilidad, resistencia a la corrosión y soldabilidad. Pueden endurecerse por tratamiento térmico (temple y revenido), pero en detrimento de su ductilidad y su resistencia a la corrosión.

Los elementos básicos de aleación son: C de 0.1 – 1.4%, Cr de 12 – 20%, N de 0 – 4%.

Otros elementos son: Si, P, Mo, Cu, Al (añadidos o residuales).

Austenítico – Ferrítico.- Son magnéticos y son mayormente conocidos como aceros inoxidable dúplex por tener una estructura mixta austenítica y ferrítica, presentan una excelente resistencia a la corrosión y soldabilidad y sus propiedades de tenacidad y ductilidad son buenas, intermedias entre los aceros austeníticos y los ferríticos, no se endurecen por tratamiento térmico, por ejemplo temple, pero si por deformación en frío o en caliente.

Los elementos básicos de aleación son: C<0.05%, Cr de 18 – 25%, Ni de 3 – 6%, Mo de 0 – 4%, N de 0.1 – 0.5%.

Otros elementos son: Mn, Si, S, P, Cu (añadidos o residuales).

1.2 OBJETIVO

El principal objetivo de este trabajo es determinar en forma experimental la influencia del nitrógeno, sobre la resistencia a la corrosión por picaduras y en la microestructura del cordón de soldadura del acero inoxidable dúplex 2205.

El nitrógeno se añade en el gas de protección durante el proceso de soldadura Tig autógeno (sin material de aporte), también conocido como Gtaw y el medio corrosivo es una solución de cloruro férrico.

Ante el escaso conocimiento de la soldabilidad de estos materiales en nuestro medio, es que se desarrolla este trabajo con la intención de contribuir con

nuestra sociedad, ya que a futuro dicho material será de gran aplicación en nuestro país, en distintos sectores industriales.

1.3 LIMITACIONES DEL TRABAJO

Debido a la falta de equipos, el trabajo se limitó a la inmersión de las probetas del acero inoxidable dúplex en un medio altamente corrosivo como es el cloruro férrico, de las cuales se evaluó su resistencia a la corrosión por diferencia de pesos, lo ideal sería analizarlos por medio de equipos computarizados que nos indiquen amperajes, voltajes y tiempos de corrosión y por supuesto el uso del microscopio electrónico, el cual realiza un barrido y puede darnos una mejor vista de la microestructura y de las pequeñas fases que se presentan.

CAPITULO II

EL ACERO INOXIDABLE DÚPLEX

Los aceros inoxidable dúplex, son los aceros que dentro de su microestructura presentan austenita y ferrita en proporciones similares. Los grados iniciales eran aleaciones de cromo, níquel y molibdeno. Los primeros fueron producidos en Suecia en 1930 y utilizados en la industria de papel de sulfito. Estos grados fueron desarrollados para reducir los problemas de corrosión íntergranular que se presentaban en los aceros inoxidable austeníticos. Los primeros objetos producidos por fundición en este material se dieron en Finlandia en 1930, y una patente fue concedida en Francia en 1936. Para el precursor del que sería conocida como Uranus 50. El tipo 329 de AISI llegó a ser establecido después de la Segunda Guerra Mundial y fue utilizado extensivamente para la tubería del intercambiador de calor para el servicio del ácido nítrico. En los años subsecuentes, los aceros inoxidable dúplex se han utilizado para una variedad de usos en la industria incluyendo los recipientes a presión, los intercambiadores de calor y bombas [4].

Estos aceros inoxidable dúplex de primera generación proporcionaron buenas características de funcionamiento pero tenían limitaciones en las condiciones de soldadura. La zona afectada por el calor (ZAC), que es la zona aledaña a la soldadura, presentaba baja dureza debido al exceso de ferrita generado por el proceso

de soldadura y perceptiblemente menor resistencia a la corrosión que el metal base. Estas limitaciones confinaron el uso de los aceros inoxidable dúplex de primera generación, en general eran difíciles de soldar, por esta razón eran limitados a usos específicos.

En 1968 la invención del proceso de refinación del acero inoxidable (AOD), abrió la posibilidad de un amplio espectro de nuevos aceros inoxidables. Uno de los avances hechos con el AOD era la adición deliberada del nitrógeno como elemento de aleación. La adición del nitrógeno como elemento aleante, de los aceros inoxidables dúplex, hace posible que la dureza de la ZAC y la resistencia a la corrosión sea similar a la del metal base después de realizado la soldadura. El nitrógeno también reduce la precipitación de fases intermetálicas, las cuales son perjudiciales.

Los aceros inoxidables dúplex de segunda generación son definidos por tener como uno de sus elementos de aleación al nitrógeno. Este nuevo desarrollo comercial, que comenzó al final de los 70, coincidió con el desarrollo de yacimientos costa afuera de gas y de petróleo en el Mar del Norte y así empezó la demanda para los aceros inoxidables con excelente resistencia a la corrosión ante un medio que contenía cloruros, de buena soldabilidad, y de alta resistencia. El acero inoxidable tipo 22Cr, 5Ni conocido también como 2205 se convirtió en el “caballito de batalla” de la segunda generación y fueron utilizados extensivamente para las líneas o tuberías que recolectan gas y usos en plataformas costa afuera. La alta resistencia mecánica de estos materiales permitió al momento de diseñar reducir el espesor y consiguó el peso a utilizar en las plataformas y con tal incentivo aumento considerablemente el uso de estos aceros inoxidables.

Como los aceros inoxidables austeníticos, los aceros inoxidables dúplex son una familia de varios grados, que se extienden en función de su resistencia a la corrosión, que dependen de su contenido de elementos aleantes. El desarrollo de los aceros inoxidables dúplex ha continuado, y los actuales se pueden dividir en varios grupos:

- Dúplex de grado 2304, que no contiene ninguna adición deliberada del Mo.
- El grado 2205 el cual representa más del 80% de uso de los dúplex, es por esto que se lo denomina el caballito de batalla de los dúplex.
- Dúplex del 25% Cr tal como la aleación 255.
- Súper dúplex, con 25 a 26% de Cr y alto contenido de Mo y N en comparación con los grados 25% Cr, incluyendo grados tales como 2507.

2.1 COMPOSICION QUIMICA DE LOS ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX

En los aceros inoxidables dúplex se considera lo más común tener cantidades ásperamente iguales de ferrita y austenita, con la producción comercial actual favoreciendo levemente a la austenita para las mejores características de la dureza y de proceso de soldadura. Las interacciones de los elementos de aleaciones principales, particularmente el cromo, molibdeno, nitrógeno, y níquel, son absolutamente complejos. Para alcanzar una estructura dúplex estable que responda bien al proceso y a la fabricación por soldadura, se debe tener cuidado para obtener el nivel correcto de cada uno de estos elementos [4].

Además del equilibrio de las fases, hay una segunda preocupación importante en los aceros inoxidable dúplex y su composición química: la formación de fases intermetálicas perjudiciales, a elevadas temperaturas. Las fases sigma y chi se forman en alto contenido de cromo, en aceros inoxidable de alto contenido de molibdeno y precipitan preferentemente en la ferrita. La adición del nitrógeno retrasa perceptiblemente la formación de estas fases. Por lo tanto, es crítico que la cantidad suficiente de nitrógeno esté presente en la solución sólida.

Lo que sigue es una breve revisión del efecto de los elementos de aleación más importantes en las características mecánicas, físicas y de la corrosión de aceros inoxidable dúplex.

CROMO (Cr)

Un mínimo de 11% de cromo es necesario para formar una película pasiva estable de cromo que es suficiente para proteger un acero contra la corrosión atmosférica moderada. La resistencia a la corrosión de un acero inoxidable aumenta con el aumento del contenido de cromo. El cromo es un formador de ferrita, esto implica que la adición del cromo estabiliza la estructura del hierro, cúbica centrada en el cuerpo. Con un contenido más alto del cromo, es necesario más níquel para formar una estructura austenítica o dúplex (austenita-ferrita). Un contenido de cromo más alto también promueve la formación de fases intermetálicas. Hay generalmente por lo menos 18% de cromo en aceros inoxidable austeníticos y por lo menos el 22% en aceros

inoxidables dúplex de segunda generación. El cromo también aumenta la resistencia a la oxidación a temperaturas elevadas. Este efecto del cromo es importante debido a su influencia en formación y retiro de la capa de óxido, resultando el calor del tratamiento térmico o de la soldadura.

MOLIBDENO (Mo)

El molibdeno actúa para apoyar al cromo en la resistencia a la corrosión debido a la presencia de cloruros, en los aceros inoxidable. Es un elemento alfégeno, mayor influencia que el cromo en la resistencia a la corrosión, debe compensarse con mas Ni para mantener el carácter austenítico, y su precio es muy elevado y fluctuante. El molibdeno aumenta la tendencia de un acero inoxidable a la precipitación de fases intermetálicas. Por lo tanto, se restringe generalmente menos de 7.5% en aceros inoxidable austeníticos y cerca al 4% en aceros inoxidable dúplex.

NITROGENO (N)

El nitrógeno aumenta la resistencia a la corrosión por picaduras de los aceros inoxidable austeníticos y dúplex. Además incrementa substancialmente su resistencia y, de hecho, es la solución sólida más eficaz que consolida a los dúplex. El nitrógeno retrasa en gran medida la formación de fases intermetálicas para permitir el proceso de fabricación de los aceros dúplex. El nitrógeno se agrega altamente a los austeníticos y dúplex resistentes a la corrosión, aceros inoxidable que contienen alto contenido del cromo y del molibdeno para compensar su tendencia a formar fase sigma.

El nitrógeno es un gran formador de austenita y puede sustituir un tanto al níquel en los aceros inoxidables austeníticos. En aceros inoxidables dúplex, el nitrógeno casi se agrega típicamente a su límite de la solubilidad, y la cantidad de níquel se ajusta para alcanzar el equilibrio deseado de la fase. Los formadores de la ferrita, el cromo y el molibdeno, son balanceados con los formadores de austenita, níquel y nitrógeno, para obtener la estructura dúplex.

NIQUEL (Ni)

El níquel es un estabilizador de la austenita. Eso significa que la adición del níquel a las aleaciones base hierro promueven un cambio de la estructura cristalina del acero inoxidable de cúbico centrado en el cuerpo (ferrítico) a cúbico centrado en la cara (austenítico). Los aceros inoxidables Ferríticos contienen poco o nada de níquel, los aceros inoxidables dúplex contienen una cantidad intermedia de níquel de 4 a 7%, y los aceros inoxidables austeníticos de la serie 300, contienen por lo menos un 8% de níquel. La adición del níquel retrasa la formación de las fases intermetálicas perjudiciales en los aceros inoxidables austeníticos pero es mucho menos efectivo que el nitrógeno al retrasar su formación en los aceros inoxidables dúplex. La estructura cúbica centrada en la cara es responsable de la excelente dureza de los aceros inoxidables austeníticos. Su presencia en los aceros dúplex aumenta de gran manera su dureza con respecto a los aceros inoxidables ferríticos.

2.2 METALURGIA DE LOS ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX

El diagrama de fase ternario del hierro-cromo-níquel es un mapa del comportamiento metalúrgico de los aceros inoxidable dúplex. Una sección del diagrama ternario con 68% de hierro (cuadro 3) ilustra que estas aleaciones solidifican como ferrita, algo de la cual entonces se transforma en austenita mientras que la temperatura baja alrededor de 1000 °C (1832 °F) dependiendo de la composición de la aleación. Hay poco cambio adicional en el equilibrio de la ferrita-austenita al del equilibrio a temperaturas más bajas. Termodinámicamente, porque la austenita está formándose de la ferrita, es imposible que la aleación vaya más allá del nivel del equilibrio de la austenita. Sin embargo, al llegar a temperaturas más bajas, carburos, nitruros, fase sigma y otras fases intermetálicas son componentes posibles de la microestructura [4].

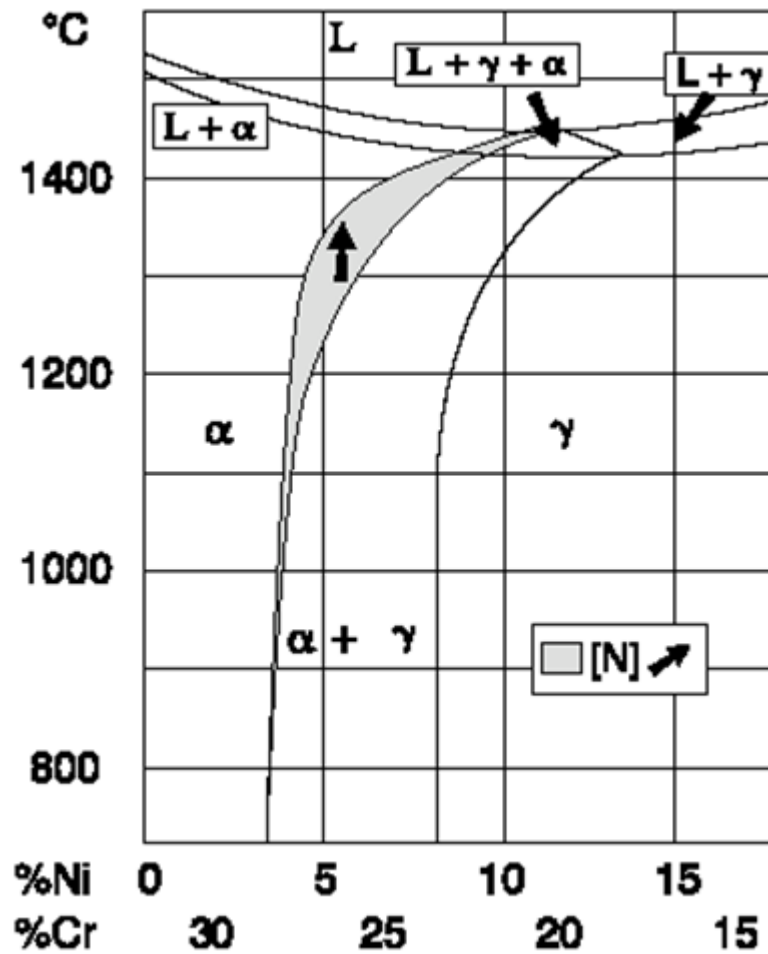


Grafico 2.1. Sección a través del diagrama de fase ternario FE-Cr-Ni con 68% de hierro (los cambios pequeños en el contenido del níquel y del cromo tienen una influencia grande en la cantidad de austenita y de ferrita en aceros inoxidable dúplex.) Aquí se nota claramente que el nitrógeno favorece la formación de austenita, levantado la curva de transformación de ferrita a austenita [4].

Las cantidades relativas de ferrita y de austenita que están presentes en un determinado producto o fabricación dependen de la composición química y de la historia térmica del acero. Los cambios pequeños en la composición química pueden tener un gran efecto en la proporción relativa del volumen de estas dos fases como lo indica el diagrama de fase.

Las tendencias de elementos individuales a promover la formación del austenita o de la ferrita se aplican razonablemente bien a los aceros dúplex. La meta de mantener el equilibrio deseado de las fases en un acero inoxidable dúplex es alcanzado sobre todo ajustando el cromo, molibdeno, níquel, y contenido del nitrógeno, y por el control de la historia térmica. Sin embargo, por la velocidad con la cual se enfría se determina la cantidad de ferrita que puede transformarse en austenita, las velocidades que siguen exposiciones de alta temperatura influyen el equilibrio de las fases. Porque el enfriamiento rápido favorece la retención de la ferrita, es posible tener más que la cantidad del equilibrio de ferrita.

Otro efecto beneficioso del nitrógeno es que levanta la temperatura en la cual la austenita comienza a formarse a partir de la ferrita. Por lo tanto, incluso a velocidades de enfriamiento relativamente rápidas, el nivel del equilibrio de austenita puede casi ser alcanzadas. En los aceros inoxidables dúplex de segunda generación, este efecto reduce el problema de exceso de la ferrita en la zona afectada por el calor.

La fase sigma se forma a temperaturas por debajo de las cuales la austenita comienza a reformarse a partir de la ferrita en enfriamiento, la meta es evitar esta fase, esto se logra seleccionando una velocidad de enfriamiento intermedia apropiada que favorezca la reformación de la austenita a temperatura alta y retarde la formación de la fase sigma a una temperatura

más baja. Afortunadamente, esta velocidad de enfriamiento intermedia es absolutamente rápida, permitiendo el uso de agua para el enfriamiento.

El uso del nitrógeno como elemento de aleación en estos aceros inoxidable significa que nitruros de cromo pueden estar presentes en los límites de grano de la ferrita-ferrita y austenita-ferrita en la zona afectada por el calor de la soldadura. Si está formado en grandes cantidades y bajo condiciones en las cuales las áreas agotadas de cromo no tienen tiempo a recuperarlos durante el recocido, los nitruros de cromo, por el contrario, pueden afectar a su resistencia a la corrosión. Sin embargo, porque un porcentaje de nitrógeno más alto promueve la formación de austenita, que tiene una alta solubilidad para el nitrógeno, los aceros inoxidable dúplex de segunda generación contienen raramente cantidades significativas de nitruros de cromo. Además, los aceros inoxidable dúplex de segunda generación se producen con un bajo contenido de carbono de modo que la formación del carburo de cromo a un grado perjudicial no sea generalmente una preocupación práctica.

Fase sigma, carburos perjudiciales y los nitruros pueden formarse en cuestión de minutos a ciertas temperaturas. Por lo tanto, los tratamientos térmicos requeridos para procesar y fabricar deben tomar la cinética de la reacción de la formación de la fase a considerar para asegurarse de que la resistencia a la corrosión y las características mecánicas deseadas sean obtenidas. Estos grados se han desarrollado para maximizar la resistencia y retardar la precipitación de estas fases.

Un diagrama isotérmico de la precipitación para los aceros inoxidable dúplex 2304, 2205, y 2507 se muestran en grafico 2.2. El comienzo de la precipitación de carburos y de nitruros de cromo comienza relativamente tarde en un tiempo de 1 a 2 minutos en la temperatura. Esto es más lento que en los grados ferríticos o los grados austeníticos altamente aleados, y son debidos, en parte, a la alta solubilidad del carbón y del nitrógeno en la fase austenítica de bajo níquel y posiblemente a un efecto del nitrógeno para retardar la precipitación de carburos.

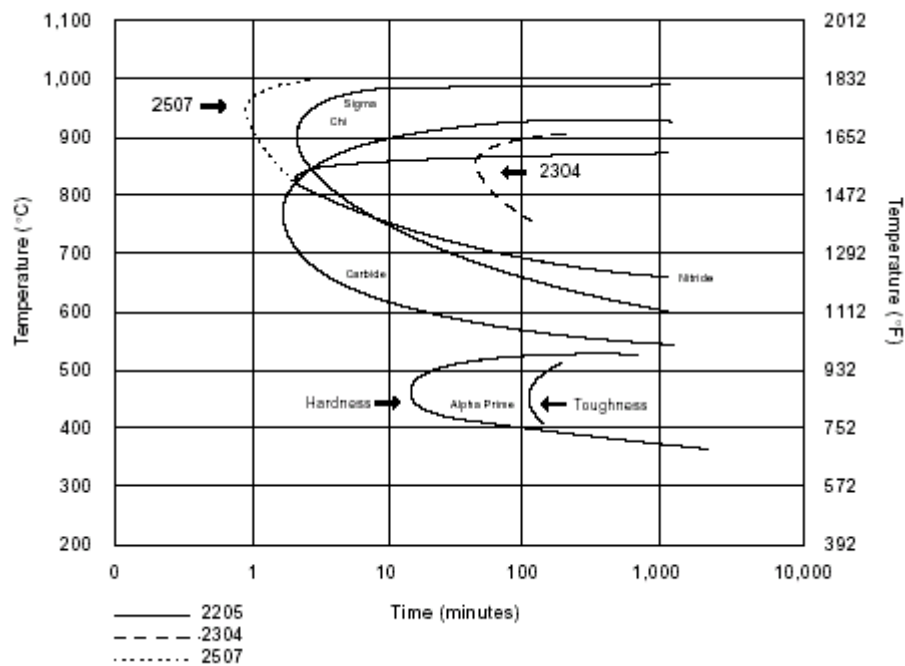


Grafico 2.2. Diagrama isotérmico de la precipitación para el acero inoxidable dúplex 2205, recocido en 1050°C (1920° F). (Los grados dúplex 2304 y 2507 se demuestran para comparación) [4].

2.2.1 Cambios Microestructurales por Encima de 1050°C.

Los aceros inoxidable dúplex solidifican en el campo de la ferrita primaria o llamada también ferrita delta (δ). Cuando la ferrita δ se va enfriando se ve favorecida la formación de la austenita por medio de la reacción $\delta \rightarrow \gamma$ que se da a partir de la solución sólida δ (ver grafico 2.3). Si existe un tiempo suficiente se produce además la difusión de elementos de aleación a medida que se da la transformación de ferrita a austenita, concentrándose en la ferrita elementos como el Cr, Mo y en la austenita elementos como Ni, C, N, etc.

Para altas velocidades de enfriamiento desde distintas temperaturas de solubilización el porcentaje de austenita producido será distinto al del equilibrio, viéndose favorecida la presencia de ferrita con el incremento de esta temperatura.

Durante el calentamiento, se conoce ampliamente que el contenido de ferrita varia con el aumento de temperatura y según la composición de la aleación. Cuando las cantidades relativas de la ferrita delta y la austenita son modificadas por tratamiento térmico, la composición química de las fases también cambia debido a difusión en la ferrita y posible enriquecimiento de las fases. Particularmente la fracción de volumen de ferrita se incrementa a medida que la temperatura se eleva, pero contiene menos cromo y molibdeno, mientras la austenita restante se enriquece con nitrógeno [6,7].

Es importante indicar que la adición de nitrógeno al desplazar la transformación de austenita a ferrita delta a temperaturas más altas limita el enriquecimiento de la ferrita en las zonas afectadas por el calor, debido a la reducción de la cinética de transformación de la austenita a ferrita, manteniendo similares a las del metal base la fracción de volumen de las fases y la composición química [6,9].

Por lo tanto la adición de nitrógeno estabiliza la estructura de los inoxidables dúplex manteniendo la cantidad en porcentaje de la austenita y la composición de las fases a altas temperaturas.

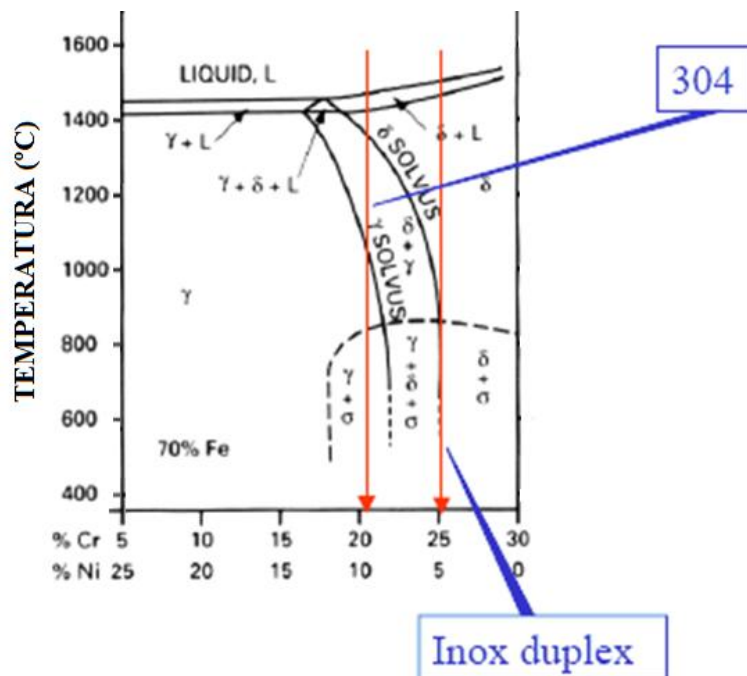


Grafico 2.3. Diagrama pseudo binario en 70% de Fe del diagrama de equilibrio Fe-Cr-Ni [10].

2.2.2 Cambios Microestructurales entre 1050° C y 600° C

La formación de carburos $M_{23}C_6$ ocurre principalmente en el rango de temperaturas de 700° a 900° C para un tiempo de nucleación relativamente corto (menos de 1 hora), también aparecen a bajas temperaturas después de largas exposiciones (ver gráfico 2.2).

Una característica importante de los aceros inoxidable dúplex es que la precipitación intergranular de carburo de cromo es generalmente discontinua y está acompañada por migración del límite de grano debido a la formación de austenita en las zonas empobrecidas de cromo de la ferrita [6].

En los dúplex con adiciones de nitrógeno controlados puede ocurrir precipitación de nitruro de cromo hexagonal (Cr_2N), además de $Cr_{23}C_6$ siendo la temperatura de formación alrededor de 900 °C, por lo que pueden aparecer de manera simultánea. Estos carburos pueden aparecer en los límites de grano de ferrita y austenita pero también en su interior, principalmente en las zonas afectadas por el calor de soldaduras conteniendo gran porcentaje de ferrita. Según la experiencia generalmente se necesitan enfriamientos rápidos desde temperaturas que bordean los 1050° C a 1150° C para prevenir completamente la precipitación de carburos de los inoxidables dúplex [6].

La formación de varios componentes intermetálicos en la ferrita entre 600° C y 1000° C puede ocurrir dependiendo de la composición química de la aleación y del tratamiento térmico empleado.

Para la aplicación en la industria, la formación de fase sigma es la más importante debido a su rápida formación en aleaciones que contienen cromo por encima de 22% y más de 2.5% de molibdeno. La precipitación de fases intermetálicas como la fase sigma en solo una pequeña fracción de la ferrita produce una caída drástica de la tenacidad al impacto a temperatura ambiente. Por otro lado partículas como carburos o inclusiones presentes en los límites de grano aceleran la formación de la fase sigma ya que actúan como sitios para la nucleación.

Fases	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo
Composición Química Inicial						
γ	0.43	22.01	1.73	67.41	5.95	2.47
α	0.49	24.63	1.53	65.56	3.90	3.89
Composición Química tras el Tratamiento Térmico						
γ	0.40	20.36	1.75	68.55	6.77	2.18
α	0.40	23.66	1.17	70.58	2.35	1.85
σ	0.62	29.34	1.45	58.93	2.50	7.17

Tabla 2.1. Composición química de las fases presentes en acero dúplex 2205 antes y después de envejecimiento a 850° C [18].

El control de elementos menores es necesario para las aleaciones enriquecidas en cromo y molibdeno que son propensas a la precipitación de fase sigma, se sabe que adiciones de nitrógeno comúnmente de 0.18 a 0.28% retarda la aparición de compuestos intermetálicos mientras que silicio y fósforo favorecen la formación de fase sigma por lo tanto deben ser mantenidos en cantidades mínimas. La influencia de manganeso es ambigua pues es un

estabilizador de la fase sigma y a la vez incrementa la solubilidad del nitrógeno.

La lentitud de la nucleación a altas temperaturas y de su crecimiento a bajas temperaturas hace posible que se pueda evitar la formación significativa de fase sigma, hasta para enfriamiento al aire de productos relativamente gruesos [6].

La fracción en volumen y composición de la austenita varían con la temperatura. El contenido de austenita puede ser incrementado por enfriamiento lento, de lo contrario, por enfriamiento rápido desde 1100° C que permite una fina precipitación de la austenita dentro de los granos de ferrita. A bajas temperaturas puede ocurrir una descomposición de la ferrita, las partículas de austenita se hacen tan pequeñas que no se pueden detectar.

Por otro lado, la precipitación de carburos, nitruros o fases intermetálicas pueden acompañar a la formación de austenita, debido a la reducción local de cromo y molibdeno.

Otro factor influyente es el tamaño de grano de la ferrita pues un tamaño pequeño es beneficioso para la reformación de austenita debido al extenso límite de grano existente donde la austenita puede nuclear [5].

2.2.3 Cambios microestructurales por debajo de 600° C

Una reacción conocida como fragilización puede ocurrir a bajas temperaturas en los aceros inoxidables dúplex, esta reacción consiste en un aumento significativo de dureza en la ferrita debido a la formación de una fase rica en cromo α' de estructura BCC.

Esta transformación no puede ser detectada por microscopia óptica debido a la similitud de las dos estructuras sumándose al tamaño tan pequeño de las partículas, solo si se observa finas laminas de metal con microscopio electrónico se puede revelar la presencia de α' por la apariencia de una estructura moteada en la ferrita, pero las partículas siguen siendo difíciles de identificar [6,7].

Además de la formación de α' , otros procesos de precipitación pueden ocurrir en la ferrita, para exposiciones largas, se pueden precipitar compuestos intermetálicos M_6C (carburos) y Cr_2N (nitruros), los últimos se forman en dislocaciones en la vecindad de inclusiones o en límites de granos. Si el contenido de cobre es mayor a 1% puede ocurrir un endurecimiento adicional debido a la precipitación de la fase épsilon (ϵ) rica en cromo de estructura FCC.

La consecuencia más importante es que estos procesos de endurecimiento conducen a la fragilización, por lo cual se debe limitar la temperatura de

servicio a un máximo de 260 a 320 °C, dependiendo del acero inoxidable que se trata, los menos propensos son los que no tienen molibdeno ni cobre.

Por otro lado el endurecimiento puede ser una ventaja para las aplicaciones específicas, como paletas de bombas o agitadores los que están propensos a fenómenos de corrosión y abrasión [6].

2.3 PROPIEDADES DE LOS ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX

2.3.1 Resistencia a la Corrosión por Picaduras

Los aceros inoxidables dúplex muestran un alto nivel de resistencia a la corrosión en la mayoría de los ambientes donde los grados austeníticos estándares son útiles. Sin embargo, hay algunas excepciones notables donde estos aceros dúplex son definitivamente superiores. Esto resulta de su alto contenido de cromo, que es beneficioso en ácidos oxidantes. El cromo relativamente alto, molibdeno y el nitrógeno también le confieren una resistencia muy buena a la corrosión por picaduras en un medio que contiene cloruros.

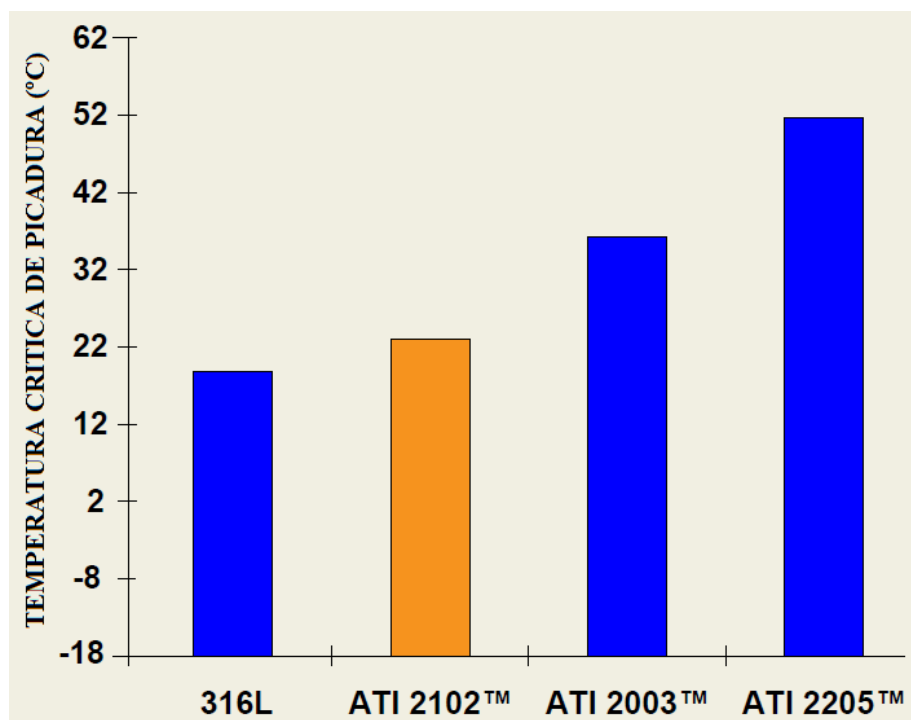


Grafico 2.4. Grafica temperatura critica a la corrosión por picadura, haciendo la comparación entre aceros inoxidable austeníticos y los dúplex [17].

2.3.2 Resistencia a la Tracción

Estos aceros además de tener una gran resistencia a la corrosión por picadura y a otros tipos de corrosión como corrosión por resquicios y corrosión por fatiga, tienen una gran resistencia mecánica.

DESIGNACION UNS	TIPO	RESISTENCIA A LA FLUENCIA (MPa)	RESISTENCIA MAXIMA (MPa)
S30403	304L	170	485
S31603	316L	170	485
S31703	317L	205	515
S32205	2205	450	620
S32304	2304	400	600

Tabla 2.2 Comparación de esfuerzos entre aceros inoxidable austeníticos y dúplex Esfuerzo de fluencia bajo el criterio del 0.2% [16]

Esta tabla nos muestra claramente que los aceros inoxidable dúplex tienen una resistencia a la fluencia y a la tracción mayor que los aceros inoxidable austeníticos.

A continuación se muestra un grafico que representa la resistencia a la corrosión por picadura y la resistencia mecánica de los diferentes tipos de aceros inoxidable.

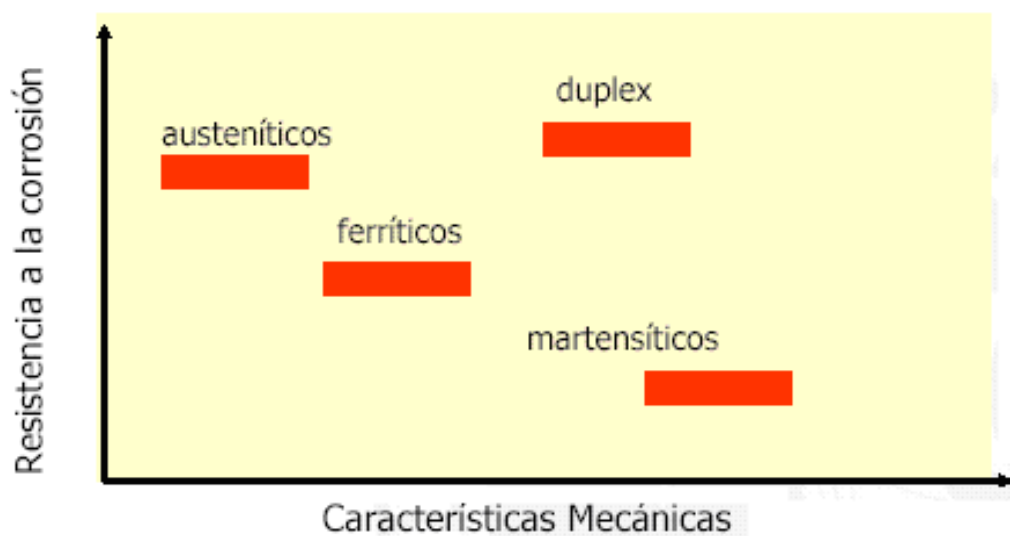


Grafico 2.5. Comparación de las propiedades en los aceros inoxidable [10]

2.3.3 Resistencia al Impacto

La tenacidad de los aceros inoxidable dúplex es intermedio entre los aceros inoxidable ferríticos y los austeníticos. Los aceros inoxidable dúplex presentan una tenacidad aceptable hasta -45°C . El contenido de ferrita es un factor importante pues a medida que aumente la cantidad de este, se reduce la

tenacidad en los aceros inoxidable dúplex. Otro factor que reduce la tenacidad es la presencia de fases intermetálicas como la fase sigma o Chi, algunos autores afirman que se pueden aceptar contenidos de 2 a 3% de fase sigma, de igual manera se ven afectadas por ser mantenidos por tiempo prolongado entre las temperaturas de 280 a 450° C lo que se conoce como envejecimiento a bajas temperaturas. Debido a estos factores se recomienda la restricción de estos aceros al rango de trabajo de -50 a 300° C.

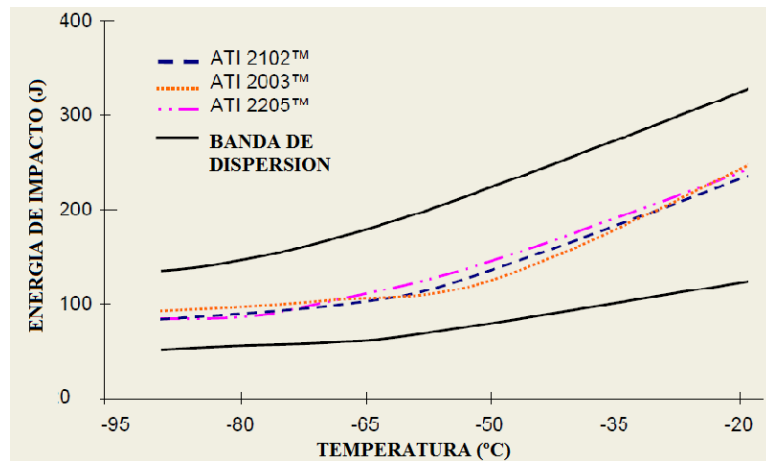


Gráfico 2.6 Variación de la energía de impacto con respecto a la temperatura [17].

2.4 SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX

El acero inoxidable dúplex presenta en su microestructura una fase dual de ferrita y austenita la cual le confiere sus buenas propiedades como a la resistencia a la corrosión así como su alta resistencia mecánica, pero ¿Qué sucede si calentamos el material? Bien, si añadimos calor a cualquier material este sufrirá cambios en su microestructura, lo cual modificaría sus

propiedades. Soldar un material implica calentarlo para poder obtener una unión o simplemente refundir una zona específica, la cual por ser de una dimensión menor a todo el material, esta se enfriará rápidamente por transferencia de calor dentro del material, pero la zona fundida y la afectada por el calor (ZAC) llegan a una temperatura la cual ayuda a la formación de ferrita. Para no perder considerablemente las buenas propiedades de este material se toma en cuenta una serie de métodos. Si enfriamos rápidamente al material se obtendrá una microestructura de casi en su totalidad de ferrita la cual ocasionará una caída considerable tanto en su resistencia a la corrosión como en sus propiedades mecánicas. Pero si el enfriamiento es lento, entonces, en el material aparecerán fases secundarias como la fase sigma y otras que son muy perjudiciales tanto en la resistencia a la corrosión como en sus propiedades mecánicas. Para evitar esto se debe obtener una microestructura casi homogénea de ferrita y austenita, para esto se debe emplear elementos que permitan la formación de austenita bajo las condiciones post soldadura y que disminuya la tendencia a la formación de fases secundarias, para esto se realizó este estudio la cual nos brinda la información necesaria para obtener una microestructura adecuada, la cual consistió en verificar si la adición de nitrógeno en la mezcla del gas de protección influyó en las propiedades de este material.

Otras formas sería utilizar un material de aporte que contenga más Ni que el material base, controlando la cantidad de calor que se debe utilizar durante el proceso de soldadura.

2.4.1 Metal de Aporte enriquecido en Níquel

Las soldaduras en aceros inoxidable dúplex hechas con un metal de aporte de la misma composición que el metal base, o sin metal de aporte, pueden tener 80 % o más de ferrita en la zona de fusión, una vez soldados. Una soldadura con ese nivel de ferrita tiene poca dureza y ductilidad, y a menudo no pasa la prueba de doblado. Un alto contenido de ferrita en la soldadura también reduce marcadamente la resistencia a la corrosión en muchos ambientes agresivos. Un enfriamiento rápido entre 1040 °C y 1150 °C devuelve la relación deseada de ferrita-austenita, pero el tratamiento no es práctico en muchos casos, y es caro. Incrementando el contenido de níquel en el metal de aporte, permite que se forme más austenita, y así la soldadura, una vez realizada tendrá entre 30% y 60% de ferrita, que es el nivel deseado. Las soldaduras hechas con metal de aporte enriquecido en níquel tienen buena ductilidad, son capaces de pasar la prueba de doblado, y tienen resistencia a la corrosión similar a la del metal base.

2.4.2 Control de la generación de calor

No hay completo acuerdo de parte de los productores e investigadores en soldadura en los límites apropiados de la generación de calor. Los argumentos para una generación de calor grande (ver fórmula), es que da más tiempo para que la ferrita se transforme en austenita, particularmente en la zona afectada por el calor. El peligro de una generación de calor grande es que podría permitir que se formen en la ferrita fases fragilizantes, tales como la fase sigma. Con los aceros inoxidable dúplex de segunda generación, se

necesita un tiempo más largo a temperatura para que se desarrollen estas fases, así que no habrá una fragilización significativa. Un rango de generación de calor generalmente aceptado está entre 0.6 y 2.6 kJ/mm (kilojoules por milímetro), aunque se han usado niveles tan grandes como 6.0 kJ/mm. Cuando se deba usar un proceso de soldadura con niveles de generación de calor menores a 0.6 kJ/mm, un precalentamiento a 95 °C – 205 °C es útil para reducir la velocidad de enfriamiento e incrementar el contenido de austenita en la soldadura.

Cuando exista una duda en la cantidad apropiada de generación de calor a aplicar para una aleación en particular, se recomienda contactar al proveedor por recomendaciones específicas.

La generación de calor en kJ/mm se calcula como:

$$HI = \frac{V \times I}{v \times 1000}$$

Donde:

HI : Calor de aporte en KJ/mm

V : Voltaje de soldadura en voltios

I : Corriente de soldadura en amperios

v : Velocidad de soldadura en mm/s

2.5 APLICACIÓN INDUSTRIAL DE LOS ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX

Antes que los aceros inoxidable dúplex se introdujeran en el mercado la única alternativa en ambientes muy agresivos eran los aceros inoxidable austeníticos con alto contenido de níquel, los cuales por el alto costo del níquel resultaban muy caros.

Durante el tiempo de aplicación industrial de los aceros inoxidable dúplex, se ha podido comprobar que no solo presentan un mejor comportamiento que los aceros inoxidable austeníticos, sino que también resultan más baratos por el bajo contenido de níquel. Como resultado de ello y su excelente resistencia mecánica, tenacidad y buena soldabilidad han encontrado un sin número de aplicaciones industriales especialmente en medios agresivos conteniendo cloruros.

Se ha encontrado aplicaciones en la industria petrolera, química, petroquímica, la industria de la pulpa del papel, industria de energía térmica y nuclear, se emplean también en la industria alimentaria donde los aceros inoxidable dúplex del tipo 2304 y 2205 pueden reemplazar ventajosamente a los aceros inoxidable del tipo 304L y 316L reduciendo el riesgo de corrosión y contaminación del producto.

La fabricación de aceros inoxidable dúplex se orienta a la fabricación de tubos para el transporte y tratamiento de agua de mar en plantas

desalinadoras, intercambiadores de calor para agua de mar clorada como medio refrigerante, recipientes a presión para unidades de osmosis inversa en plantas desalinadoras y sobretodo en sistemas de transporte de medios agresivos con altos contenidos de cloro o contaminados con acido clorhídrico.

También se incluye la fabricación de tanques de almacenamiento para buques cargueros donde el acero inoxidable dúplex 2205 ha mostrado tener una resistencia superior al acero inoxidable austenitico 317LN y a permitido un ahorro significativo en el peso de la estructura. Lo que puede traducirse en un ahorro económico.



Figura 2.1. Tanque de almacenamiento de productos químicos en cargueros, construidos con aceros inoxidables dúplex [15].

Uso en la industria de la estructura de concreto reforzado con barras corrugadas. Investigadores de la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M) han publicado un estudio sobre las propiedades de los aceros inoxidables dúplex frente a los procesos de corrosión en el hormigón armado. La

implementación de refuerzos de este tipo de aceros en las zonas críticas de una edificación garantizaría la vida útil de las mismas en los ambientes marinos, donde las concentraciones de cloruros son más elevadas.



Figura 2.2 Concreto reforzado con barra corrugada de acero inoxidable dúplex izquierda y barra corrugada de acero al carbono [21].

Gracias a su gran resistencia mecánica y a la corrosión, los aceros dúplex se pueden utilizar en la fabricación de estructuras que tendrán como lugar de trabajo zonas altamente corrosivas así se presenta el caso del puente Stonecutters que se encuentra en China, cuyas torres se elevan 200 m y con una longitud de 1600 m, este puente se convertirá en un componente clave de la actividad comercial de china.

La dificultad para tener acceso y realizar el mantenimiento de la parte superior de las torres fueron los motivadores para que los diseñadores en Arup Hong Kong, insistieran en utilizar un material que durante 120 años no necesitara mantenimiento alguno. Para satisfacer los rigurosos requisitos estructurales y superficiales, la Arup Materials Consulting de Londres,

seleccionó placa laminada en caliente de acero inoxidable dúplex grado S32205 (con 4.5 a 6.5 % de níquel) para fabricar la parte superior de las elevadas torres. Cerca de 2,000 toneladas de la aleación S32205 serán utilizadas.

La compañía Outokumpu de Suecia está suministrando la aleación S32205 así como los consumibles de soldadura.

Durante la elección del material que se utilizaría para la coraza, los diseñadores decidieron que aún y cuando el acero al carbono ofrecía una resistencia estructural de 450 Newtons por milímetro cuadrado, no ofrecía el nulo mantenimiento que se requería. Los aceros inoxidables austeníticos no cumplían con los requerimientos de resistencia estructural (300 Newtons por milímetro cuadrado) dice Graham Gedge, especialista en materiales para proyectos. Hubiéramos tenido que utilizar placas más gruesas y más pesadas y por consiguiente más caras; con el uso de la aleación S32205 sabíamos que al utilizar placa laminada en caliente, cubríamos la resistencia de 450 Newtons por milímetro cuadrado.

Hubo otra razón por la cual se descartaron los aceros inoxidables convencionales: Una larga exposición del acero bajo la acción de este ambiente marino contaminado hubiera requerido una preparación minuciosa y controlada de la superficie del material. La valoración de la durabilidad del ambiente en el cual se espera que estos materiales trabajen es C5M, la peor

clasificación atmosférica bajo la cual puede estar expuesto un material según la clasificación ambiental de la ISO.

El acabado superficial de la aleación S32205 es el idóneo ya que es el que los diseñadores especificaron. El acero S32205 es menos susceptible a la corrosión por picaduras y al manchado que otras aleaciones competidoras, explica Graham Gedge. El control de la rugosidad superficial se vuelve menos crítico aún y cuando sobre esta queden atrapadas partículas de suciedad y sal.



Figura 2.3 Puente Stonecutters en china fabricado a base de acero inoxidable dúplex [20].

A parte de tener en cuenta la resistencia a la corrosión, debemos tener en cuenta su gran resistencia mecánica y lo que esto significa.

Las propiedades mecánicas de los aceros dúplex facilitan un gran ahorro de costos:

1. Menor espesor y por tanto menos material a comprar.
2. Menor costo en preparación de bordes.
3. Menor aporte de material de soldadura.
4. Menos tiempo de soldeo.
5. Menor costo en END (Ensayos No Destructivos)
6. Menor ratio de manejo en taller Tn/hombre.
7. Menor capacidad de grúa requerida.
8. Menor peso en transporte.

La suma de todos estos costos es un ahorro muy considerable. Por tanto aquí hay muchas razones para emplear estos materiales

CAPITULO III

PROCESO DE SOLDADURA

La soldadura es en realidad un proceso metalúrgico, por eso entender como los metales se comportan durante su producción y fundición es conocer los fundamentos de la soldadura.

La mayoría de los procesos de soldadura, al igual que en la fundición de los metales, requieren la generación de altas temperaturas para hacer posible la unión de los metales envueltos. El tipo de fuente de calor es básicamente lo que describe el tipo de proceso, Ej. : Soldadura oxigas, soldadura de arco (eléctrica). Uno de los principales problemas en soldadura, es el comportamiento de los metales ante la combinación de los agentes atmosféricos y los cambios en su temperatura. El método de proteger el metal caliente del ataque de la atmósfera es el segundo de los mayores problemas a resolver. Las técnicas desarrolladas desde "Protección por fundente" (Flux Covering), hasta la de Protección por gas Inerte, son más que escudos protectores en muchos casos pero eso es básicamente para lo que fueron creados. En algunas instancias la atmósfera es removida toda usando sistemas de vacío como en el caso de soldadura por Haz de Electrones.

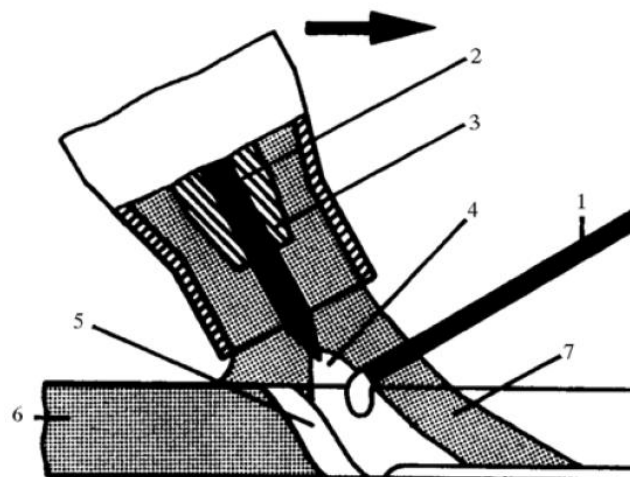
Algunos de estos procesos han sido desarrollados para algunas aplicaciones específicas mientras otros se mantienen muy flexibles cubriendo un amplio rango de actividades en la soldadura. Aunque la soldadura es usada principalmente para unir metales similares y hasta partes metálicas no similares es también muy usada, de manera muy notable, para reparar y reconstruir partes y componentes averiados o gastados. Existe, también, un crecimiento notable en el uso de diferentes aplicaciones para tratar las superficies con una capa de alto endurecimiento (recubrimiento duro) de partes nuevas, que provee una superficie altamente resistente a la corrosión, abrasión, impactos y desgaste. Introducido en las últimas décadas del siglo 19, el proceso de arco se mantiene como el más usado de todos los grupos de las técnicas de soldadura. Como el mismo nombre lo sugiere, es un arco eléctrico que se establece entre las partes a ser soldada y un electrodo metálico. La energía eléctrica, convertida en calor, genera una temperatura en el arco cerca de 2,500 grados centígrados, causando la fundición de los metales y después la unión. El equipo puede variar en tamaño y complejidad, siendo la diferencia principal entre el proceso de arco, el método usado para separar la atmósfera o crearla y el material consumible empleado para ser aportado al proceso.

Entre los procesos de Arco se incluyen la soldadura de electrodo cubierto, conocido como MAA/SMAW (Manual Metal Arc/ Shielded Metal Arc Weldng), GMAW (Gas Metal Arc Welding) o también conocido como MIG (Metal Inert Gas) , el sistema de alta deposición por Arco Sumergido SAW (Submerged Arc Welding), GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) o comúnmente conocido como TIG (Tungsten Inert Gas).

Existen Otras variantes como la PAW (Plasma Arc Welding) Soldadura por Plasma, EW (Electro Escoria) y la soldadura (sin arco eléctrico) por fricción FSW (Friction Stir Welding) que forman parte de los nuevos avances tecnológicos que se adelantan en los procesos de soldaduras para crear alternativas adaptadas a los procedimientos de alta producción y limitaciones especiales de ciertos procesos o materiales[1].

3.1 PROCESO GTAW

El procedimiento de soldeo por arco bajo gas protector, también llamado TIG (Tungsten Inert Gas), utiliza como fuente de energía el arco eléctrico que se establece entre un electrodo no consumible y la pieza a soldar, mientras un gas inerte protege el baño de fusión. El material de aportación, cuando se utiliza, se aplica por medio de varillas como en el soldeo oxiacetilénico[2].



- 1.- Varilla de aporte
- 2.- Electrodo
- 3.- Boquilla
- 4.- Arco
- 5.- Metal de soldadura fundido
- 6.- Pieza de trabajo
- 7.- Protección gaseosa

Figura 3.1 Proceso TIG.

Las ventajas de este proceso de soldaduras son las siguientes

- Produce soldaduras de alta calidad.
- Permite soldar una gran variedad de materiales.
- Posee un arco estable y concentrado.
- No presenta salpicaduras.
- No deja escoria que limpiar.
- Se puede soldar con o sin material de aporte.
- Excelente control de la penetración en la pasada de raíz.
- Alta velocidad de soldeo para espesores menores a 4 mm.
- Las fuentes de poder no son relativamente caras.
- Aplicables a gran variedad de juntas y toda posición de soldadura.
- Control independiente de la fuente de calor y del suministro del material aporte.
- Se puede soldar materiales desde 0.6 mm. de espesor.

Las limitaciones de este proceso de soldadura son las siguientes:

- Ratios de deposición horaria bajas.
- Requiere gran habilidad del soldador.
- No es económico para espesores mayores a 10 mm.
- En lugares en donde haya corriente de aire se debe proteger bien la zona de soldadura.

3.1.1 Características del Proceso

El proceso TIG se usa para el soldeo de todos los materiales, incluidos el aluminio y el magnesio y los materiales sensibles a la oxidación como el titanio, circonio y sus aleaciones.

Puesto que el proceso posee las virtudes necesarias para conseguir soldaduras de alta calidad y con una elevada pureza metalúrgica, exentas de defectos y con un buen acabado superficial, es ideal para soldaduras de responsabilidad en la industria del petróleo, química, petroquímica, alimento, generación de energía, nuclear y aeroespacial.

Como su tasa de deposición es baja, no resulta económico para soldar materiales con espesores mayores a 6-8 mm. En estos casos este proceso se utiliza para efectuar la pasada de raíz, empleándose otros procesos de mayor productividad para el resto de pasadas [2].

3.1.2 Principales parámetros de Soldero

Entre los principales parámetros tenemos al electrodo, esto determina la intensidad de soldeo. Si empleamos una intensidad baja para un diámetro de electrodo dado se ocasionara inestabilidad del arco. Si por el contrario usamos una intensidad excesiva podremos originar erosión y fusión de la punta del electrodo, así como inclusiones de tungsteno en el metal soldado.

Con corriente directa los electrodos tienen su máxima capacidad de conducción de corriente. Con corriente inversa solo se puede un 10%, de la cantidad que podría conducir en las condiciones anteriores. En el caso de corriente alterna podríamos obtener un 50% de la capacidad máxima de conducción de corriente.

Diámetro del electrodo (mm)	Diámetro interior de la tobera (mm)
1.6	10
2.4	12
3.2	12
4	12
4.8	16
6.4	19 - 20

Tabla 3.1 Selección del diámetro de la tobera [2]

Otro parámetro importante es el tipo de corriente eléctrica a emplear. El proceso TIG puede utilizarse tanto en corriente continua como en corriente alterna. La elección de la clase de corriente y **polaridad**, se hará en función del material a soldar. Con el fin de realizar esta elección correctamente, vamos a destacar unos aspectos diferenciales de ambas alternativas.

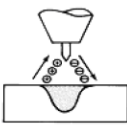
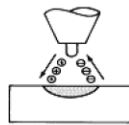
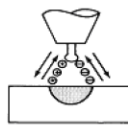



Tipo de corriente	Corriente continua	Corriente continua	Corriente alterna
Polaridad	Directa	Inversa	
Flujo de electrones e iones			
Aspecto de la penetración			
Acción decapantes	No	Sí	Sí. Una vez durante el semiciclo positivo
Balace calórico (aproximado)	70% en la pieza. 30% en la punta del electrodo	30% en la pieza 70% en la punta del electrodo	50% en la pieza 50% en la punta del electrodo
Penetración	Profunda y estrecha	Ancha y menos profunda	Media
Comportamiento del electrodo	Excelente. Ej. 400 A; 3,2 mm	Pobre. Ej. 30 A; 3,2 mm	Buena Ej. 225 A; 3,2 mm

Tabla 3.2 Características del tipo del corriente [2].

Los otros parámetros son:

- Voltaje de Arco.- Es la tensión necesaria para generar un flujo eléctrico
- Corriente de Soldadura.
- Tipo de electrodo de tungsteno.
- Gas de protección.
- Caudal de gas.
- Velocidad de avance.
- Material de aporte (si lo hay).

CAPITULO IV

GASES DE PROTECCIÓN

La función principal del gas de protección es desplazar el aire de la zona de soldadura para proteger al metal fundido, el baño de fusión y al electrodo, para evitar su contaminación. Esta contaminación es originada principalmente por el oxígeno, nitrógeno y agua presente en la atmósfera que pueda reaccionar con el metal fundido, causando defectos que debiliten la soldadura [2].

Otras funciones del gas de protección son influir en:

- El tipo de transferencia del metal.
- Estabilidad del arco.
- Las propiedades mecánicas.
- La penetración, en el tipo y tamaño del cordón.
- los costos de soldadura.
- La cantidad de energía que pasa a través del arco eléctrico.
- Formar parte del plasma que se genera al pasar la corriente de soldadura a través del espacio entre el electrodo y el metal a soldar.

En algunas aplicaciones, es necesario utilizar además del gas de protección propiamente dicho, otros gases como gas de respaldo, también llamado gas de backing, se utiliza para proteger la parte posterior de la soldadura. En la soldadura de tubería para proteger la raíz.

4.1 FACTORES QUE AFECTAN LA ELECCION DEL GAS

En ocasiones, hay un factor que tiene una mayor importancia, y por si solo determina el gas adecuado, en otras, es necesario hacer una evaluación de varios factores, los fundamentales son:

- Procedimiento de soldadura.
- Material a soldar.
- Espesor del material.
- Posición de soldadura.
- Material de aportación.
- Propiedades mecánicas requeridas.
- Penetración.
- Velocidad de soldadura.
- Calidad exigida.
- Humos.
- Aspecto final costo.

4.2 PROPIEDADES DE LOS GASES

4.2.1 Energía de Ionización

Es la energía expresada en electrones volteos (eV), necesarios para liberar un electrón de un átomo en estado gaseoso convirtiéndolo en un ion, o en un átomo cargado eléctricamente.

Manteniendo el resto de las variables constantes, el potencial de ionización disminuye cuando el peso molecular se incrementa.

La energía necesaria para la ionización es tomada del arco. Una vez ionizado el gas, se tendrán los electrones libres para soportar el flujo de corriente entre el espacio que separa el electrodo y el metal base.

4.2.2 Conductividad Térmica

La conductividad térmica de un gas mide la facilidad con la que conduce el calor. Influye en la pérdida radial de calor desde el centro a la periferia de la columna del arco eléctrico. Un gas con una conductividad térmica elevada, conduce más el calor de la parte interior hacia la parte exterior, dando como resultado una penetración más ancha y uniforme, un arco más caliente.

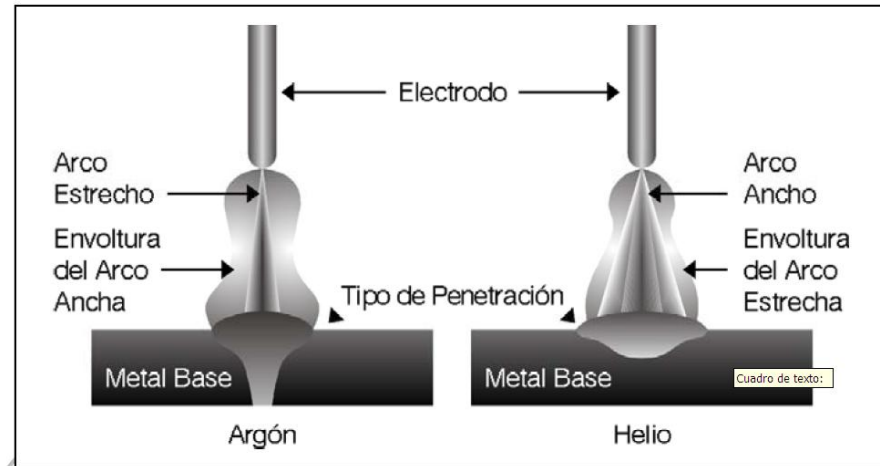


Figura 4.1 Forma del cordón según conductividad térmica [2].

4.2.3 Disociación

Es el proceso por el cual una molécula formada por varios átomos, se descompone en los átomos que la forman. Los gases con CO₂, O₂ y H₂ pueden descomponerse o disociar su molécula por las elevadas temperaturas presente en el arco eléctrico. Cuando el gas disociado llega a la superficie de metal base frío, los átomos se recombinan generando un calor adicional. Esto no sucede con Argón que es un gas noble.

GAS	ENERGIA DE DISOCIACION (eV)
H ₂	4,5
O ₂	5,1
CO ₂	4,3
N ₂	9,8

Tabla 4.1 Valores de Energía de disociación de algunos gases [2].

4.2.4 Reactividad

Esta propiedad, cuando se refiere a gases de protección, mide la capacidad (a la temperatura del arco) que tiene para reaccionar con los elementos químicos en el baño de fusión.

4.2.5 Densidad

Es el peso del gas por unidad de volumen. Es uno de los factores más influyentes en la efectividad del gas de protección. Los gases más pesados como el CO₂ y Ar necesitaran un menor caudal que los gases más ligeros.

Símbolo químico	Ar	CO ₂	He	H ₂	N ₂	O ₂
Nº Atómico	18	--	2	1	7	8
Peso Molecular	39.95	44.01	4.00	2.016	28.01	32.00
Peso Específico (Aire=1)	1.38	1.53	0.1368	0.0695	0.967	1.105
Densidad (0 °C, 1 Atm.)	1.678	1.849	0.176	0.085	1.188	1,342
Energía de Ionización (ev)	15.7	14.4	24.5	13.5	14.5	13.2
Conductividad Térmica (10 ⁻³ x Btu/hr x ft x °F)	9.69 (32 °F)	8.62 (32 °F)	85.78 (32 °F)	97.22 (32 °F)	13.93 (32 °F)	14.05 (32 °F)

Tabla 4.2. Propiedades físico-químicas de algunos gases [2].

Los gases que se emplean como gases de protección guiados por las características dadas son

Argón (Ar), helio (He), dióxido de carbono (CO₂), nitrógeno (N), oxígeno (O₂), Hidrogeno (H).

A continuación hablaremos de los dos gases usados en este trabajo.

4.3 ARGÓN

Se obtiene, a partir de la destilación del aire donde está en proporción aproximada del 1 %. No tiene olor, ni sabor, ni color y no es toxico. Es inerte y no reacciona durante la soldadura [2].

Por el conjunto de sus propiedades físico-químicas es el más utilizado como componente mayoritario en las mezclas de gases de protección en la soldadura por arco eléctrico.

También se emplea solo o con heleo en soldadura láser o corte plasma dual, mezclado con hidrogeno en los aceros inoxidable.

Tiene una energía de ionización baja, que facilita el inicio del arco y su estabilidad. Esta es otra de sus características que hace que sea utilizado ampliamente.

Densidad elevada, 1.4 veces más pesado que el aire, lo que le ayuda en su función de protección a desalojar el aire de la zona de soldadura. Tiene una conductividad térmica baja.

4.4 NITROGENO

Se obtiene a partir de la destilación del aire donde está en proporción aproximada del 78%. No tiene olor, ni color, ni sabor. Es inerte excepto a las temperaturas del arco eléctrico, donde reaccionara con algunos metales como aluminio, magnesio y titanio.

No se recomienda su aplicación en la soldadura GMAW, ni solo, ni como componente mayoritario. Forma parte de mezclas de protección para la soldadura de aceros inoxidable dúplex y como componente mayoritario en las mezclas N_2+H_2 como gas de respaldo o gas backing [2].

Se emplea en el corte por plasma y en el corte con láser de CO_2 como gas de proceso y de asistencia en el corte de aceros inoxidable.

CAPITULO V

CORROSIÓN EN ACEROS INOXIDABLES

Los materiales, y en especial los metales, son obtenidos a partir de especies minerales estables en las condiciones naturales. Por tanto, al ser expuestos a las condiciones ambientales, una vez extraídos, tienden a estabilizarse química y energéticamente. El paso espontáneo de estos materiales a su estado natural combinado, es llamado corrosión.

Por consiguiente, este fenómeno, es el responsable directo de la destrucción de materiales constructivos, de los daños indirectos que esta falta provoca y de los inconvenientes que suponen su sustitución, representando así un verdadero problema económico.

Por tanto, la corrosión es un proceso a veces inevitable, cuya prevención es difícil, y donde es posible y practicable un control y una protección contra el mismo.

El proceso de corrosión especialmente en los metales, es un proceso electro-químico, donde suceden reacciones de oxidación y reducción, estableciéndose un intercambio de electrones, y consecuentemente el paso de una corriente eléctrica de componente

continua entre un ánodo y un cátodo, a través de un medio conductor, como en una pila galvánica.

En la mayoría de medios naturales, la presencia de agua es un factor destacable. Por tanto, el estudio de los procesos de corrosión naturales deberá centrarse en el de las reacciones en medios acuosos.

5.1 CORROSIÓN POR PICADURAS

Es una forma de corrosión muy localizada, que se visualiza en forma de finos agujeros en la superficie del metal, como la consecuencia de la acción de iones despasivantes como los haluros, de los cuales el más importante es el ion cloruro (Cl^-). La corrosión se presenta en una muy pequeña porción de la superficie mientras que el resto permanece protegida por una capa pasivante [3].

Esta forma de corrosión es extremadamente destructiva pues es capaz de perforar una tubería con solamente una pequeña pérdida de material. Por ello es muy difícil de detectar, mas aun si las picaduras se suelen cubrir con productos de la corrosión. Este tipo de corrosión se presenta en aleaciones pasivables y es particularmente importante en el caso de los aceros inoxidable.

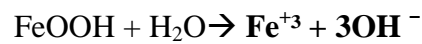
Los aceros inoxidable sufren corrosión por picaduras en soluciones neutras y acidas conteniendo cloruros o iones conteniendo cloro. Estas condiciones se

suelen encontrar en ambientes marinos y en diversos procesos químicos industriales.

La corrosión por picadura de aceros inoxidable se presenta en:

- Soluciones acuosas NaCl, CaCl, FeCl₃, CuCl₂.
- Soluciones acuosas de hipocloritos.
- Agua conteniendo haluros.
- Aguas salobres sobre todo estancadas.

En la ausencia de cloruros, la película pasiva (del Fe) se disuelve pero a velocidades muy lentas de acuerdo a la siguiente reacción:



El ion Cl⁻ por su parte, favorece la liberación de Fe⁺³ mediante

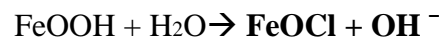


Figura 5.1 Inicio de la corrosión por picaduras

Ello va removiendo o desplazando la capa pasiva hasta que la solución entra en contacto con el metal provocando su disolución directa iniciando la picadura.



Las inclusiones no metálicas como los sulfuros, óxidos de aluminios y de cromo son lugares preferentes para nuclear picaduras. Las inclusiones pueden tener comportamiento anódico respecto de la matriz lo cual provocaría su disolución y la formación de un micro resquicio. Si por el contrario estas se comportan catódicamente la zona de la matriz aledaña sufrirá corrosión generando igualmente micro resquicios o hendiduras.

Una vez producida la rotura de la capa protectora los iones Cl^{-} son atraídos por los iones Fe^{+2} al fondo de la picadura produciéndose la siguiente reacción de hidrólisis:

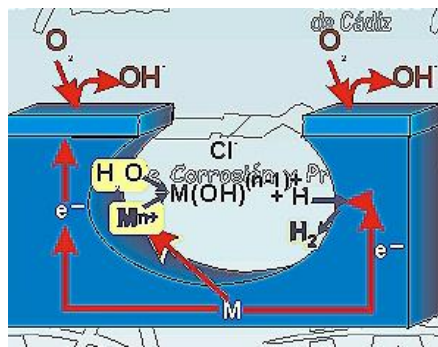
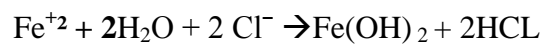


Figura 5.2 Propagación de la picadura

5.1.1 Efecto de la Composición Química

La resistencia a la corrosión por picaduras en los aceros inoxidable está fuertemente influenciada por su composición química y en especial por el contenido de elementos como el Cr, Mo y N. Como resultado de numerosos estudios se ha llegado establecer de manera empírica que relaciona estos elementos con la resistencia a la corrosión por picaduras (y/o resquicios). Este parámetro es conocido como la “resistencia equivalente a la picadura” (PREN).

$$\text{PREN} = \% \text{Cr} + 3.3\% \text{Mo} + 30\% \text{N}$$

A continuación veamos cómo afectan estos elementos a la resistencia a la corrosión por picaduras:

Un aumento del contenido de cromo en la aleación permite una capa pasiva más estable al mejorar su capacidad a la repasivación, cuando en la solución están presentes iones agresivos como los cloruros [14].

Por otro parte en zonas donde la concentración de los cloruros es alta esta rompe la capa pasiva generando así las picaduras en algunos aceros inoxidable, en estos casos se presentan ciertas reacciones que contribuyen al crecimiento de la picadura así como.



Las cuales aumentan el carácter ácido en el fondo de la picadura y a su vez esta acelera la corrosión en el fondo de la picadura.

El molibdeno es muy bueno para mejorar la resistencia a la corrosión por picaduras de los aceros inoxidable en medios que contienen cloruros. El efecto beneficioso del molibdeno podría estar relacionado con la formación de un óxido de Mo^{+6} en la película pasiva que bloquea la penetración de los iones Cl^- , reduciendo de esta manera la corrosión [14].

La presencia de molibdeno en aleaciones de Fe-Cr permite la formación de una sal insoluble en el fondo de la picadura, lo que favorecería la pasivación del fondo de la picadura. Sales de cloruro de molibdeno poseen una baja solubilidad, mientras que los cloruros Fe y Cr son bastante solubles en agua [14].

Se obtuvo evidencia de que la absorción de molibdatos en la parte exterior de la capa pasiva podría tener un efecto muy beneficioso en la resistencia a la corrosión por picaduras. Debido a que la formación de molibdatos produce una deprotonización de iones OH^- , esto puede favorecer la formación de iones NH_4^+ en el fondo de la picadura, que amortigua el pH local de la solución y hace un ambiente más estable para los molibdatos.

El nitrógeno es otro elemento que mejora en gran medida la resistencia a la corrosión por picaduras. Algunos autores proponen lo siguiente:

Cuando el nitrógeno aleado se disuelve, consume protones de la solución ubicada en la picadura, que amortigua la solución y previene la reducción localizada del pH, ayudando a la repasivación de la picadura antes de que esta se propague [14].

El papel del nitrógeno sobre la resistencia a la corrosión también puede estar relacionado con un enriquecimiento de cromo de la superficie de la aleación durante el proceso de la disolución anódica. Se especula que, debido a la afinidad de Cr por el N, este último retrasa la difusión de Cr en la austenita. Así mismo, el N se acumula en la intercara metal/óxido durante el proceso de corrosión, reteniendo con él al Cr en la película pasiva [14].

Cuanto más alto es el índice PREN mayor será la resistencia a la corrosión por picadura [3].

Existen otros elementos de aleación que pueden tener efectos beneficiosos o perjudiciales. Así como la presencia de fases secundarias, compuestos intermetálicos e impurezas presentes en el material.

	EFEECTO	RAZONES
C	Negativo	Causa precipitación de carburos provocando empobrecimiento de Cr
Si	Positivo	Estabiliza la película pasiva de la aleación
Mn	Negativo	MnS son puntos de inicio de picaduras. Mn desestabiliza la capa pasiva
S	Negativo	Sulfuros favorecen la formación de picaduras
Cr	Positivo	Estabiliza la capa pasiva
Ni	Positivo Negativo	Mejora resistencia en inoxidable austenítico. Diluye N en fase γ con lo que reduce su resistencia a la picadura en inoxidable dúplex
Mo	Positivo	Estabiliza la capa pasiva y mejora la resistencia a la picadura
N	Positivo	Incrementa significativamente la resistencia a la picadura de inoxidable austenítico y dúplex
W	Positivo	Efecto similar al Mo
%Ferrita	Positivo Negativo	Incrementa el % de N, Cr y Mo de la fase γ mejorando la resistencia a la corrosión en inoxidable dúplex. Reduce la resistencia a la corrosión en inoxidables austeníticos
Carburos y nitruros de Cr	Negativo en medios oxidantes y con cloruros	Producen empobrecimiento en Cr favoreciendo la corrosión por picaduras
Fases σ, χ, R, G,...	Negativo	Producen empobrecimiento en Cr y Mo y reducen la resistencia a la corrosión.

Tabla 5.1. Influencia de elementos y compuestos sobre la resistencia a la corrosión[3].

5.1.2 Efecto de la microestructura

La ferrita en los aceros inoxidable dúplex sufre varias modificaciones durante el ciclo térmico, sobre todo en operaciones de soldadura y conformado. Las diferentes fases que se puedan formar son ricas en cromo y molibdeno cuya influencia en el comportamiento ante la corrosión es fundamental. La matriz que rodea a estos precipitados puede verse afectada debido a la disminución de estos dos elementos, produciendo un decremento en la resistencia a la corrosión en forma localizada. Estos efectos son observados con frecuencia en los ácidos sulfúricos, clorhídrico, nítricos y otras soluciones, en los cuales las regiones carentes en cromo y molibdeno son las más perjudicadas. La resistencia a la corrosión puede variar dependiendo del tipo de fase precipitada, ya que el enriquecimiento en cromo y molibdeno puede ser variada [6]

El agua de mar o el agua de mar clorada empleada en sistemas de desalinización tienen condiciones más oxidantes que una solución de cloruro de sodio de la misma composición.

5.1.3 Evaluación de la resistencia a la corrosión por picaduras

La corrosión por picaduras es una forma de corrosión que es muy difícil de predecir, su nucleación depende muchos factores, desde la presencia de iones despasivantes, presencia de inclusiones no metálicas en la superficie, ralladuras o discontinuidades en recubrimientos, estabilidad de depósitos (óxidos, polvo, lodos, etc.) sobre la superficie pasiva del metal.

Existen ensayos normalizados que permiten evaluar la resistencia a la corrosión por picaduras en diferentes aleaciones. Uno de los más empleados para la evaluación de los aceros inoxidable es la norma ASTM G-48.

Los ensayos de inmersión son los métodos más sencillos para evaluar la susceptibilidad a la corrosión por picadura. Estos ensayos pueden simular lo mejor posible las condiciones de servicio a la cual estaría expuesto un material o pueden emplear soluciones estándares que sirvan para comparar el comportamiento de diferentes materiales entre sí. Estos últimos suelen estar normalizados y son de uso más frecuente.

Por ejemplo, para evaluar la resistencia a la corrosión por picaduras de los aceros inoxidable se emplea como medio corrosivo el cloruro ferrico (FeCl_3), que al ser una solución acida, oxidante y conteniendo cloruros promueven rápidamente la nucleación de picaduras en estos materiales. Es por tanto, un medio muy agresivo que acelera el proceso de corrosión localizada y sirve para comparar diferentes comportamientos entre los aceros inoxidable. La norma ASTM G-48 describe varios métodos de evaluación empleando en ellos una solución de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

CAPITULO V

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

6.1 MATERIAL OBJETO DEL ESTUDIO

En el presente estudio se ha empleado un tipo de acero inoxidable dúplex, el grado 2205, el cual se importo de EEUU porque en nuestro medio no es comercial. El espesor del material es 8mm.

A continuación mostramos la tabla de los elementos aleantes y designación de este acero según normas internacionales.

NOMBRE OUTOKUMPU	No INTERNACIONAL DEL ACERO		COMPOSICION QUIMICA					PREN
	EN	ASTM	C	N	Cr	Ni	Mo	
2205	14.462	S32205	0.02	0.17	22	5.7	3.1	35

Tabla 6.1 Designación y principales elementos aleantes del acero Dúplex 2205.

ASTM	σ fluencia Ksi (MPa)	σ Max Ksi (MPa)	Elongacion (%)	DUREZA (HRC)
S32205	72.735(500)	112450(775)	31.6	21

Tabla 6.2 Principales propiedades mecánicas.

6.2 PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

Para la realización de los cordones de soldadura por el proceso de arco de tungsteno y gas (GTAW) autógeno se utilizó el siguiente equipo de soldeo.

- Máquina KEMPPI modelo: Master TIG MLS™ 2300. Ver figura 2.1
- Carro porta antorcha portátil AIR LIQUIDE-SAF WELDING CAR, con variador de velocidad de avance y posicionamiento múltiple para antorcha. Ver figura 2.2.
- Plancha de aluminio como base.

El equipo mencionado permitió que se pueda realizar el soldeo de la mejor manera posible.

Se controlaron las siguientes parámetros de soldeo:

- Velocidad de soldeo.
- Posicionamiento de la antorcha.
- Selección de la corriente de soldadura.
- Selección de polaridad.
- Caudal del gas de protección.



Figura 6.1. Maquina de soldar KEMPPi
Modelo MasterTIG MLS™ 2300.

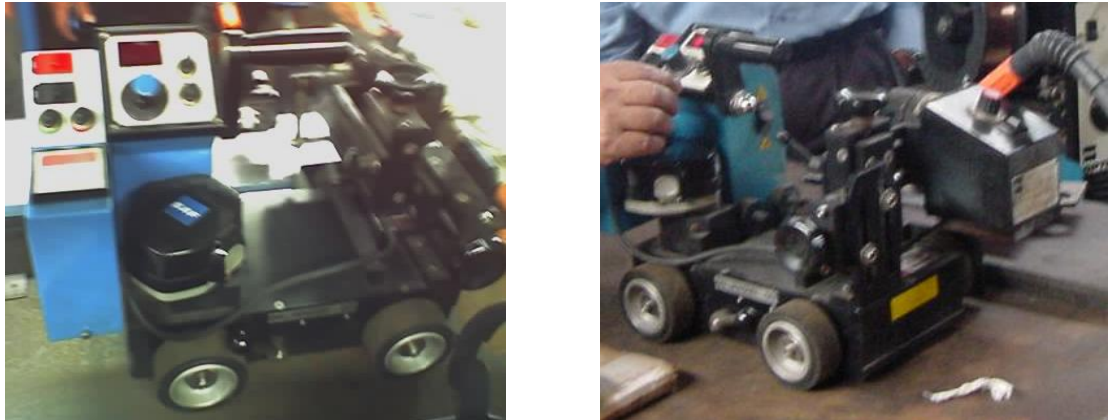


Figura 6.2. Vistas del carro porta antorcha con regulación de
velocidad de avance

6.3 PREPARACION Y PROCESO DE SOLDEO

Las planchas de suministro del material tenían las dimensiones de 20x20x8cm, para el proceso de soldeo se utilizaron planchas de 5x10cm. No se realizó la preparación de bordes debido a que no se utilizó material de

aporte, solo se hizo una refusión, para los propósitos de estudio. Los parámetros de soldeo se obtuvieron con el objetivo de lograr mezcla de gases distintos de protección para el material.

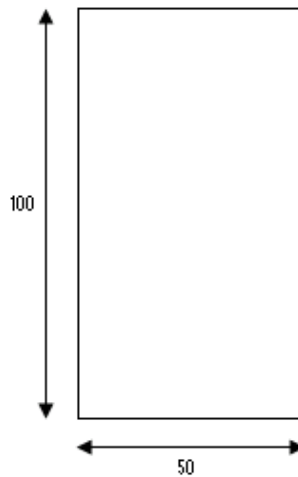


Figura 6.3. Dimensiones del cupón de soldadura en mm.

Las muestras fueron cortadas mecánicamente mediante el uso de una guillotina hidráulica, la cual no genera calor que modifique las propiedades del material. Antes del soldeo se desbastó la superficie con lija N°- 600 y se limpió con alcohol para remover posibles indicios de grasa, luego se pasó trapo limpio.

El Procedimiento de soldeo

- Posicionamiento del material: Se utilizó una base de aluminio para mantener la horizontalidad del material para que no haya variación en la longitud del arco.



Figura 6.4. Base de aluminio para mantener la horizontalidad del material.

- limpieza del material: Luego de posicionado el material se procedió a limpiarlo con alcohol.
- Disposición de soldeo: se dispuso el carro portátil de tal manera que la soldadura quedara centrada con la mayor precisión posible, además de mantener la longitud del arco.

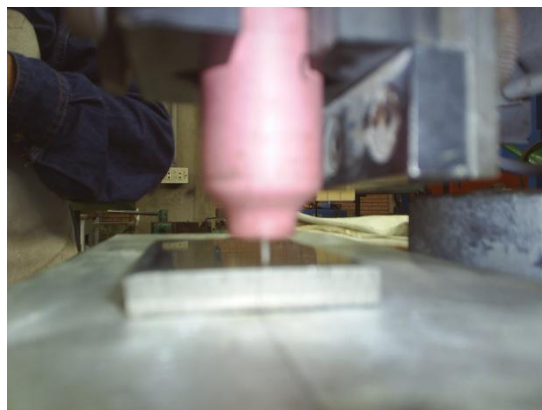


Figura 6.5. Posicionamiento del carro porta antorcha y la antorcha.

- Fijación de parámetros: se fijó los parámetros de soldeo en la máquina de soldar y la velocidad de soldeo en el carro porta antorcha según recomendaciones para el calor de aporte según Sandvik, además se definió el caudal del gas de protección.

Sandvik	Heat input kJ/mm
SAF 2304	0.5–2.5
SAF 2205	0.5–2.5
SAF 2507	0.2–1.5

Tabla 6.3. Calores de aporte recomendados

Heat input: Calor de aporte



Figura 6.6. Fijación de parámetros en la máquina de soldar

Procedimiento durante el soldeo

- En este estudio la variable fue el porcentaje de Ar y N presentes en el gas de protección.

CONDICION	MEZCLA
1	100% Ar
2	98% Ar – 2% N
3	95% Ar – 5% N

- Las variables que permanecieron constantes fueron: El caudal del gas de protección, la longitud del arco, la intensidad de corriente, la geometría del electrodo, velocidad de avance del carro porta antorcha.

PARAMETROS	CONDICIÓN		
	1	2	3
Amperaje	200	200	200
Voltaje	14.2	15.5	16.5
Velocidad de avance mm/seg	2.18	2.12	2.18
Calor de aporte kJ/mm	1.3	1.46	1.5

Tabla 6.4. Condiciones de soldeo que se emplearon

Corriente de soldadura	200 amperios
Tipo de electrodo	W-Th (\emptyset 3/32)
Caudal del gas de protección	20 l.p.m
Polaridad	Electrodo al negativo

Tabla 6.5. Parámetros que permanecieron constantes.

- Para realizar el soldeo se controló el encendido y apagado del arco mediante un soldador calificado.
- El funcionamiento del carro porta antorcha se realizó accionando un interruptor de encendido-apagado. Se visualizaron las intensidades y voltajes de soldeo en el panel de la máquina de soldar. El proceso de soldeo se puede apreciar en la figura 6.7.

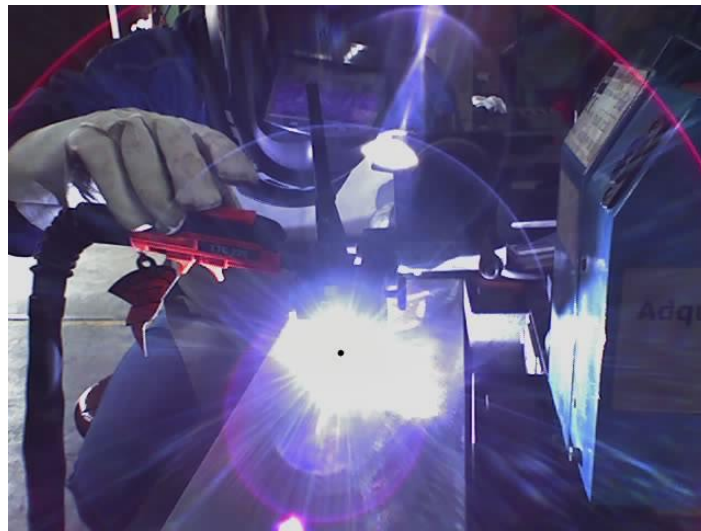


Figura 6.7. Proceso de soldeo de las planchas

- Una vez realizado el soldeo se dejó enfriar a temperatura ambiente. Ver figura 6.8



Figura 6.8. Enfriamiento después de terminado el proceso de soldeo

Procedimiento post soldeo

- Luego de enfiada la soldadura al aire libre, se procede a realizar la limpieza de los cordones con una escobilla de acero inoxidable para no contaminar el material, luego se desbaste con un esmeril empleando lijas N°200 y 600 hasta eliminar el oxido formado por la soldadura, se limpio con desengrasante.



Figura 6.9. Desbaste de las planchas soldadas con esmeril.

6.4 PROCEDIMIENTO DE CORTE PARA LAS MUESTRAS.

Después de realizado el soldeo se procedió a identificar las planchas soldadas con un marcador de tinta indeleble, diferenciando cada condición. Ver figura 4.10.

- Se marcaron con plumón las líneas de corte.
- Antes de cortar se identifico cada probeta con marcador de tinta indeleble.
- Luego se procedió al corte utilizando una sierra cinta circular, la cual tenía un avance lento y a la vez era enfriado por aire para no sobrecalentar al material. La plancha se dividió en 5 partes iguales, 3 se emplearon para el ensayo de corrosión y los 2 laterales se emplearn para los ensayos de dureza, macrografía y micrografía.

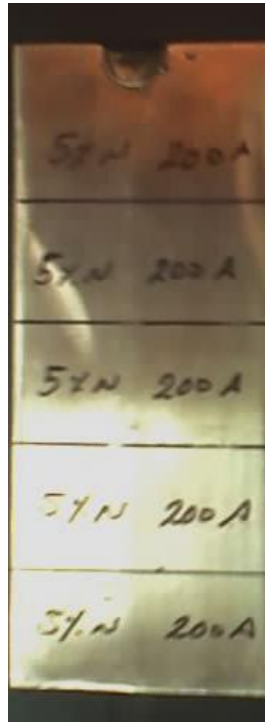


Figura 6.10. Trazado y corte de las probetas de ensayo.



6.5 PROCEDIMIENTO METALOGRAFICO.

El análisis macrográfico de los cordones de soldadura para cada condición de soldeo se realizo luego de atacar las probetas y revelar la microestructura.

Utilizando el microdurometro Vickers se procedió a medir el ancho del

cordón y profundidad de penetración, medidas que dependen de los parámetros de soldeo utilizados. Ver figura 6.11.



Figura 6.11. Equipo de micro dureza Vickers marca Leitz.

El análisis micrográfico se realizó con el fin de observar las variaciones microestructurales después del proceso de soldeo, la geometría obtenida del cordón de soldadura, la morfología de los granos en la zona fundida, para esto se utilizó microscopio óptico de marca LEITZ WETZLAR.



Figura 6.12. Microscopio óptico marca LEITZ WETZLAR.

Se utilizaron técnicas apropiadas para este propósito las cuales se describen a continuación.

Preparación de probetas

Las probetas destinadas para el análisis metalográfico se prepararon cuidadosamente debido a que la buena preparación de estas influye en los resultados de revelado de la microestructura.

Los pasos a seguir fueron los siguientes:

- Se desbastaron las probetas en los equipos del laboratorio de materiales de la PUCP, se desbastaron la superficie con un disco circular N° 80 hasta tener una superficie plana, y luego se paso al desbaste fino, usando lijas N° 240, 400, 600, 800, 1000

- Las probetas se lavaron con detergente y algodón para eliminar restos de partículas grandes que puedan rallar la superficie del metal.
- El pulido se realizó en el equipo de pulido, primero el pulido grueso con alumina de 1 micra y después el pulido fino con alumina de 0.3 micra.

Micro ataque metalográfico

Para realizar el análisis metalográfico se utilizó el siguiente ataque:

Ataque coloreado de Bloech y Wedl.

Esto se da por la combinación de los siguientes compuestos:

- 10 ml de HCl.
- 90 ml de agua destilada.
- 1 gr de $K_2S_2O_5$.

Por lo tanto después del pulido las probetas fueron atacadas introduciendo estas en la solución descrita a temperatura ambiente.

La inmersión se realizó de 6 a 10 segundos dependiendo de la condición de soldeo utilizada.



Figura 6.13. Preparación de ataque coloreado.

Luego de revelar la microestructura se procedió a registrar fotográficamente cada una de las condiciones de soldeo así como del material base.

6.6 ENSAYOS DE CORROSION POR PICADURAS

Ensayos de corrosión por inmersión

Los ensayos de corrosión por picaduras en general requieren de una preparación muy exhaustiva de la superficie de las probetas, para evitar la presencia de corrosión por resquicio durante el ensayo. En caso fuera evidente este tipo de corrosión el ensayo se anula y los resultados obtenidos serán totalmente descartados.

Preparación de las probetas

Se uso como referencia la Norma ASTM G48 - Método A “Ensayo de corrosión por inmersión en una solución de Cloruro Ferrico”

Procedimiento de preparación de especímenes para ensayo.

Pulido y limpieza de las probetas.

- Las probetas se pulieron en toda la superficie con lijas N° 240, 400, 600, 800 y 1000.
- Las probetas de ensayo de dimensiones 45 X 17mm se pulieron con alúmina en suspensión de 1 micra, especialmente los bordes donde no deben existir ralladuras ni bordes agudos, caso contrario se generaría zonas propensas a la corrosión.
- Se limpiaron las probetas después del pulido con alúmina, se limpio usando algodón con pasta de detergente y con abundante agua, se introdujeron en un envase de vidrio con acetona o metanol (sustancia que desengrasa) y se procedió a realizar la limpieza ultrasónica, limpieza por vibraciones de alta frecuencia, por 2 minutos, se retiraron cuidadosamente con pinzas y secaron con aire caliente.

Decapado y pasivado de las probetas.

- Se decaparon las probetas en una solución acuosa de 10% de HNO₃ (Ácido Nítrico) +3% de HF (ácido fluorhídrico). El HF concentrado reacciona con el vidrio por eso se emplea recipiente de plástico. Evitar contacto con la piel y las vías respiratorias por ser un acido altamente peligroso y dañino. Se utilizó 200ml de la solución, se tiene 174 ml. de agua destilada, se agregó 20ml de HNO₃ y 6 ml de HF. Todo esto se hace para remover óxidos, contaminantes metálicos (provenientes del mecanizado) y capa superficial empobrecida en cromo (debida a tratamientos térmicos y/o soldadura).

- Se sumergieron las probetas en la solución por un tiempo de 5 minutos. Después se retiraron y enjuagaron con abundante agua, luego con alcohol y se secaron en aire caliente.
- Se procedió al pasivado de las probetas, esto remueve partículas de hierro e inclusiones no metálicas e incrementa la protección de la capa pasiva, se utiliza una solución acuosa de 30% de HNO₃. En una solución de 200ml se tiene 140ml de agua destilada y 60ml de HNO₃ (Ácido Nítrico). Se calentó la solución en un pírex hasta que alcance los 60°C (±2), a esta temperatura se introdujeron las probetas y se mantuvieron por un tiempo de 15 minutos tratando de controlar la temperatura con un termómetro, después se retiraron las piezas cuidadosamente y enjuagaron con abundante agua, luego se enjuagaron con alcohol y se secaron en aire caliente. Al utilizar estos reactivos se debe tener mucho cuidado, usar campana extractora, guantes y respiradores, abrir las ventanas del ambiente.

Inmersión de las probetas en el medio corrosivo.

- Se preparo la solución para la inmersión: se disolvió 100gr de FeCl₃.6H₂O (Cloruro Férrico) en 900ml de agua destilada. Esta solución de 1000ml alcanza para verter en 2 envases (500ml en cada uno), la solución debe ser por lo menos 5ml por cada cm² de superficie expuesta del espécimen. De acuerdo a esto se pudo poner 2 o más probetas de la misma condición en un envase con 500ml de solución.

- Antes de haber puesto las probetas en inmersión se lijó la cara en la zona del cordón con una lija de granulometría 1000, es decir por toda el área del cordón de soldadura.



Figura 6.14. Inmersión de la probeta en la solución de cloruro férrico.

- Luego se limpia con algodón y pasta de detergente y luego se realiza la limpieza por ultrasonido, en acetona por 3 minutos
- Se pesa cada probeta con una aproximación de 0.001 gr. se debe secar muy bien antes de pesar pues la humedad influye en el peso inicial y puede conllevar a errores, antes de la inmersión se registro el peso de cada probeta, área de exposición, hora, día de inicio de ensayo además de una muestra fotográfica de la probeta antes de la inmersión.



Figura 6.15. Balanza de alta precisión hasta 0.0001gr

- El tiempo de inmersión será entre 24 h. y 72 h., cada 24 horas se retiraron las muestras para verificar la existencia de corrosión. Por lo tanto se enjuagaron en abundante agua luego se realizó la limpieza ultrasónica en acetona por 3 minutos. Luego se enjuagaron con abundante agua, alcohol y se secaron en aire caliente. Luego se procedió a pesar si la pérdida por corrosión no era percibida se procedería a sumergir la probeta nuevamente y dejada por otras 24 horas más.
- Si la pérdida era significativa (picaduras muy visibles y pérdidas altas de peso) se procedería al término del ensayo de inmersión (todas las probetas deben tener el mismo tiempo de inmersión). Se enjuagaron con abundante agua luego se realizó la limpieza ultrasónica por 3 minutos, se lavó con alcohol y luego de secarlos muy bien se procedió al pesado de las probetas.
- Registrar peso inicial de cada espécimen así como muestras fotográficas después de retirar las probetas de la solución, además se pueden ver al microscopio a bajos aumentos y también tomar fotografías

6.7 ENSAYOS DE DUREZA

El ensayo de dureza se realizó en la sección de las probetas destinadas a este propósito, como un indicador que ayude a determinar cómo influyeron las distintas condiciones empleadas en la soldadura. Las principales modificaciones esperadas son cambios micro estructurales y en composición de las fases en el cordón de soldadura así como en la zona afectada por el calor. De tal manera se llevó a cabo el barrido de durezas en el cordón de soldadura como se muestra en la figura.



Figura 6.16. Medición de microdureza Vickers.

Para realizar el barrido de dureza se tuvo que preparar la probeta metalográficamente con el fin de visualizar las distintas zonas del cordón. Adicionalmente se tuvo que escoger la carga a emplearse considerando el tamaño de la huella producida en la microestructura. El equipo empleado fue el microdurometro Vickers marca Leitz.

- Se usó como referencia la norma de ensayo ASTM E384-89
- La carga utilizada fue de 300 gr.
- El tiempo establecido fue de 15 s.
- Se midieron las diagonales de la huella.

CAPITULO VII

RESULTADOS Y ANÁLISIS

7.1 RESULTADOS MACROGRAFIA.

Gracias al análisis macrográfico se pudo obtener los valores de ancho y profundidad de los cordones de soldadura

CONDICIÓN	PENETRACION	ANCHO
1	1.55	10.1
2	1.95	11.7
3	2.7	12.1

Tabla 7.1. Dimensiones del cordón en la sección transversal en mm.

Según los resultados dados en la tabla se puede notar que el ancho y la profundidad del cordón aumentan cuando se incrementa el porcentaje de nitrógeno en el gas de protección, es decir a mayor porcentaje de nitrógeno aumenta la penetración y el ancho del cordón. Gracias a este método se puede obtener el área del cordón de soldadura de las probetas, que serán expuestas a la corrosión.

100% Ar 200 Amp.



98% Ar - 2%N 200 Amp.



95% Ar - 5%N 200 Amp.

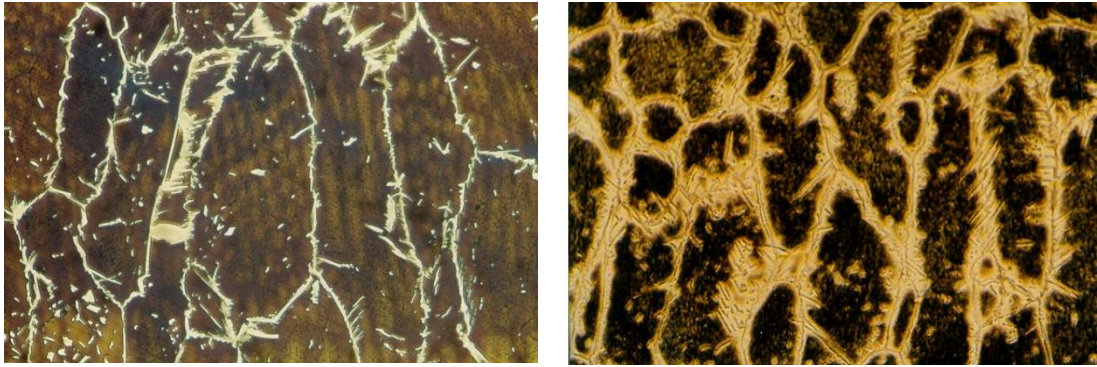


Figura 7.1. Forma, ancho y profundidad del cordón, de las muestras soldadas

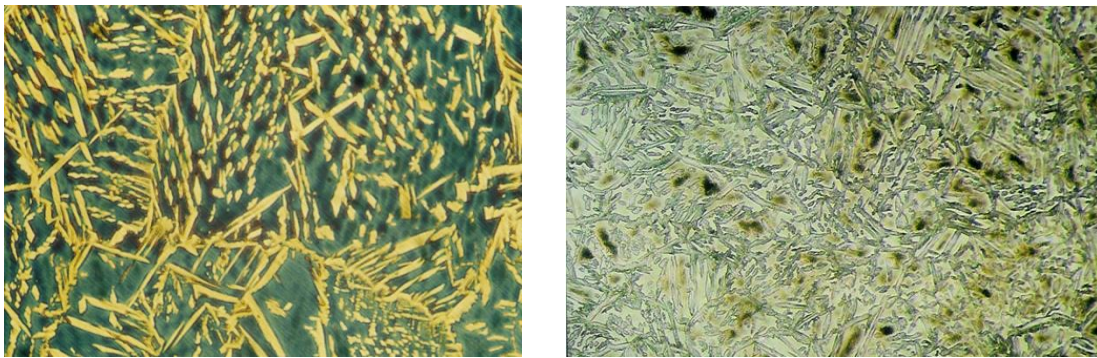
7.2 RESULTADO MICROGRÁFIA.

Los cambios microestructurales y la composición química de las fases de los aceros inoxidable dúplex después de realizado el proceso de soldadura, dependen del pico más alto de temperatura, calor de aporte, temperatura de precalentamiento, del gas de protección y otros factores que influyen en esto. De alguna manera estos cambios microestructurales influyen en gran manera en las propiedades del material.

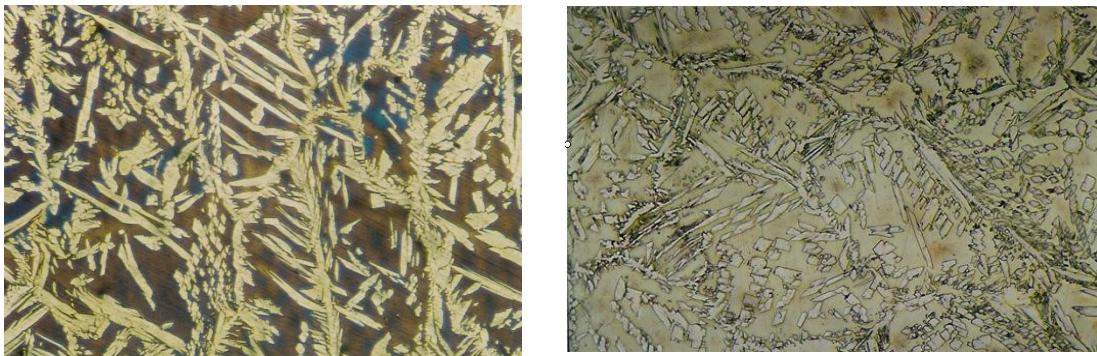
A continuación se muestra la micrografía de la zona fundida de las tres condiciones.



a) Micrografía, 100% Ar, zona fundida tomadas a 200 aumentos

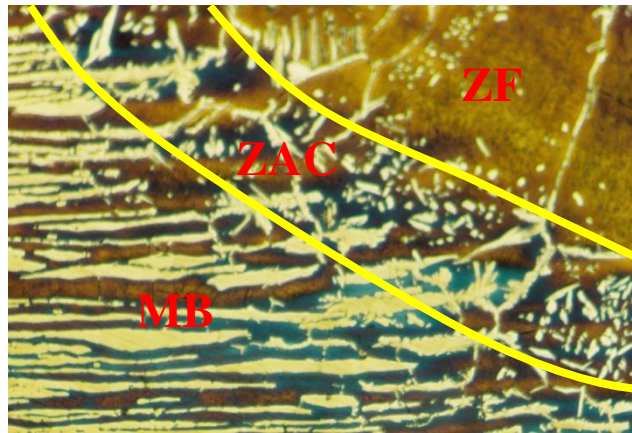


b) Micrografía, 98% Ar-2% N, zona fundida tomadas a 200 aumentos

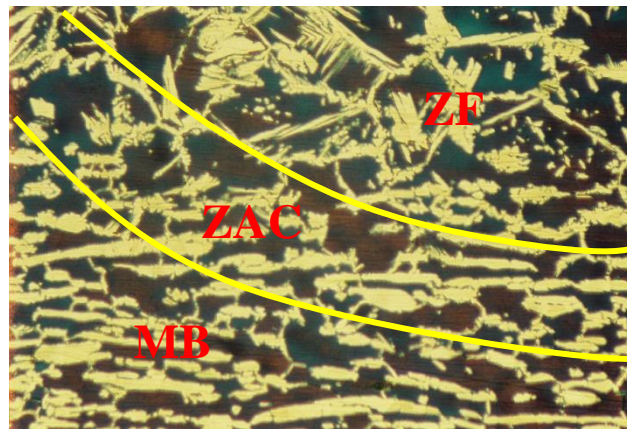


c) Micrografía, 95% Ar-5% N, zona fundida tomadas a 200 aumentos

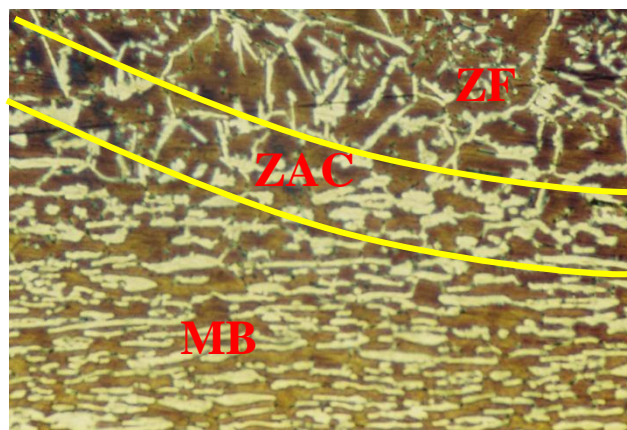
Figura 7.2. Comparación entre las microestructuras usando diferentes mezclas de protección, además podemos comparar el ataque coloreado, izquierda, y el ataque con ácido oxálico, derecha.



a) Zac-zona fundida gas de protección 100% Ar



b) Zac-zona fundida gas de protección 98% Ar-2% N



c) Zac-zona fundida gas de protección 95% Ar-5% N

Figura 7.3. Comparación entre las microestructuras zac-zona fundida tomadas a 200 aumentos.

Según la micrografía se determina que usando las mezclas:

Ar. Puro.- Se obtuvo granos grandes de ferrita en mucha más cantidad que la austenita. Esto se debe al crecimiento del grano a una elevada temperatura y a su enfriamiento rápido con la cual la difusión del nitrógeno en el material no podrá darse de forma regular, esto permitirá que la ferrita no se transforme en austenita.

Ar-N.- En ambos casos se obtuvo una cantidad semejante entre ferrita y austenita, en este caso la difusión del nitrógeno en el material es rápida debido a la abundancia de este elemento que se suministra a través del gas de protección. Se obtiene pequeños granos de austenita a partir de la ferrita, además la austenita aparece en forma de austenita primaria y austenita secundaria (en forma de placas tipo Widmanstätten), Esto debido a la presencia de nitrógeno el cual es un gran formador de austenita.

El resultado de haber empleado argón puro es que la microestructura obtenida difiere en gran medida a la del metal base ver figura 7.3. a. Por otro lado usando como gases de protección argón-nitrógeno se obtuvo una gran semejanza entre la microestructura del material base y el de la zona fundida ver figuras 7.3.b y 7.3.c.

7.3 RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA

Las propiedades de los aceros inoxidable dúplex se obtienen a partir de la mezcla de las fases austenita y ferrita en porcentajes de casi 50% cada una. Mientras que la ferrita le confiere alta resistencia a la tracción la austenita le proporciona buena ductilidad y tenacidad. Esto se distorsionaría si una de las fases disminuye y la otra aumenta, esto se da en operaciones de calentamiento como es el caso del proceso de soldadura. Los valores de dureza dependen de las siguientes situaciones:

Variación en la microestructura debido a la entrega de calor al material, esencialmente se toma los valores más altos de temperatura a la cual llega a estar sometido el material.

Variación en la composición química debido a la tendencia de ciertos elementos aleantes a difundirse y agruparse en ciertas zonas del material.

Precisar la influencia de estos factores es muy difícil [9], por ende no se tiene una explicación satisfactoria para los resultados que se han obtenido.

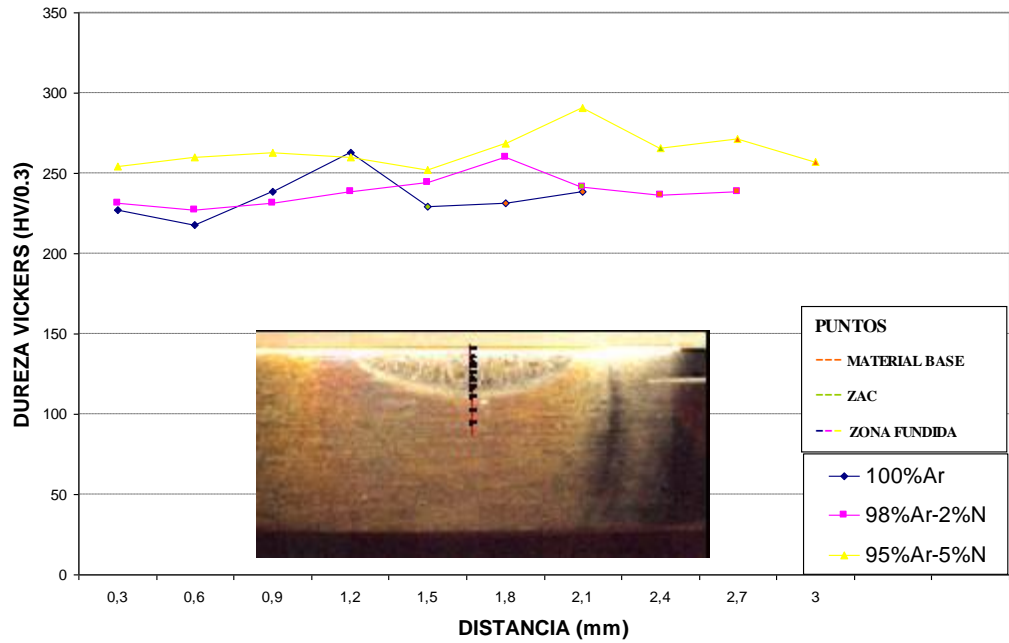


Grafico 7.1. Barrido de dureza de la sección en forma vertical a partir de la superficie.

Según la grafica en el barrido de dureza vertical se nota que a mayor contenido de nitrógeno mayor es la dureza obtenida, además aquí se puede apreciar la comparación entre las profundidades, alcanzadas por las condiciones de soldadura antes explicada.

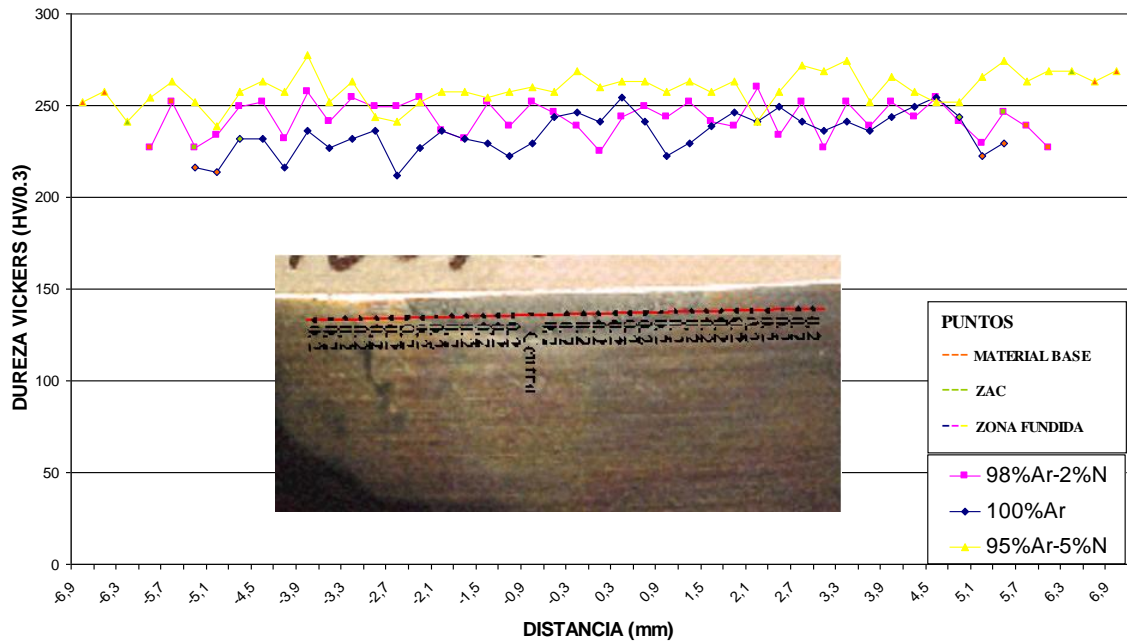


Gráfico 7.2. Barrido de dureza en forma horizontal

En la grafica se puede apreciar el barrido de dureza tomada en forma horizontal, que a mayor porcentaje de nitrógeno en el gas de protección la dureza aumenta, así mismo lleva una tendencia similar a la del barrido de dureza en forma vertical

7.4 RESULTADOS DEL ENSAYO DE CORROSIÓN

Por ser el material un acero inoxidable, su estudio no tendría razón de ser si antes no evaluamos su resistencia a la corrosión. Una de las principales propiedades es su alta resistencia a la corrosión por picaduras la cual es afectada por la entrega de calor, en este caso el calor se da por medio del proceso de soldadura. El método de ensayo usado fue el de inmersión en un medio altamente corrosivo, cloruro férrico. Todas las probetas bajo las mismas condiciones, para comparar las tres condiciones de soldeo.

		HORA		
		0	24	48
PESO(gr)	100% Ar	52.4000	52.3200	52.111
		53.7350	53.3049	53.3046
		52.3400	52.3028	52.3026
	98% Ar-2% N	50.7832	50.7830	50.7829
		51.6595	51.6594	51.6590
		52.2620	52.2620	52.2618
	95% Ar-5% N	52.2708	52.2708	52.2707
		50.2287	50.2287	50.2285
		52.7950	52.7950	52.7950

Tabla 7.2. Pesos tomados de las muestras antes y después de la inmersión en cloruro férrico.

De esta tabla y con la ayuda del ensayo macrográfico podemos obtener la pérdida en peso por unidad de área es decir.

$$p = \frac{P}{A}$$

Donde:

p: Pérdida de peso en mg/cm²

P: pérdida de peso en mg

A: Área del cordón de soldadura expuesta a la corrosión en cm².

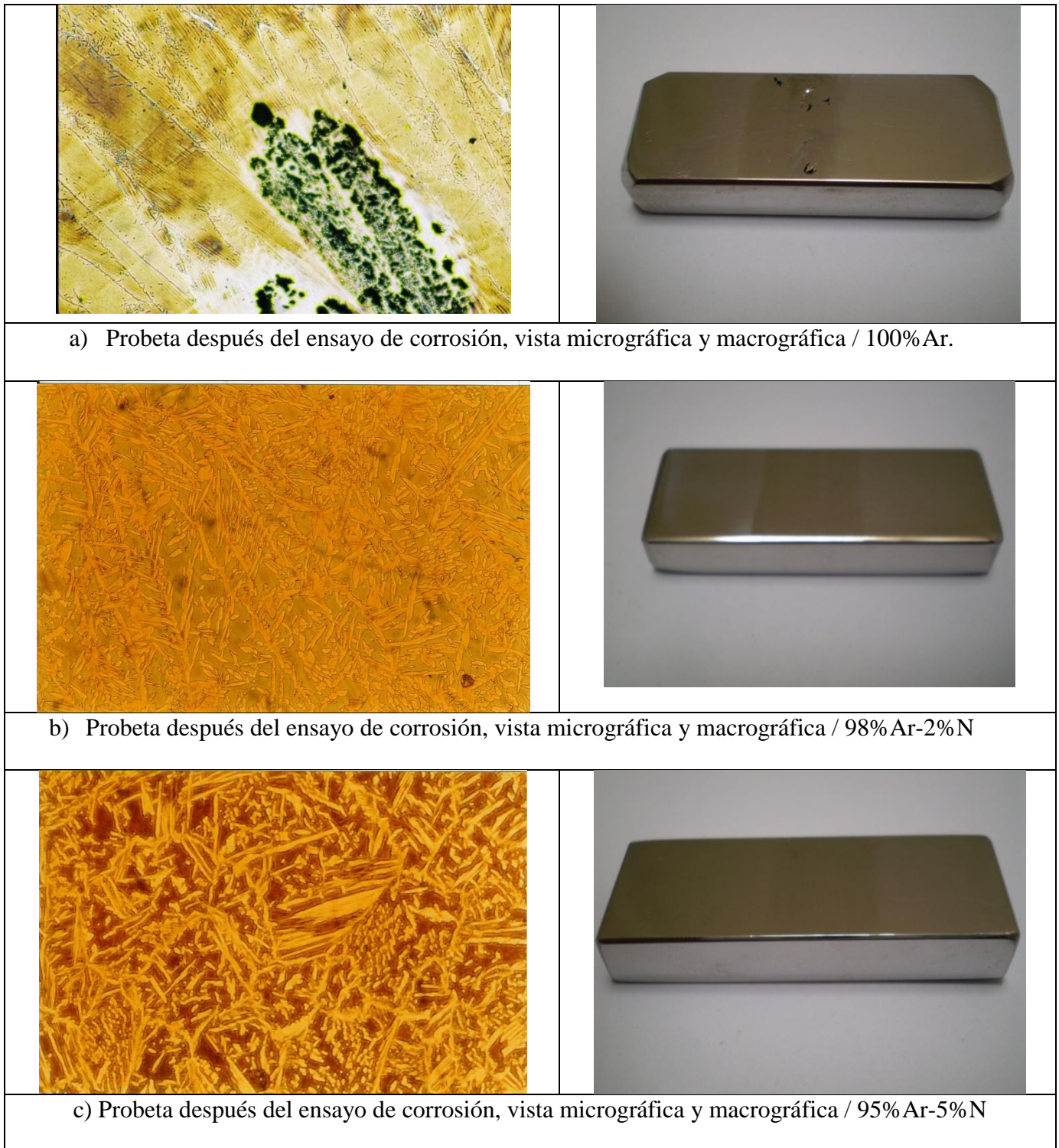


Figura 7.4. Comparación entre las probetas sometidas a corrosión.

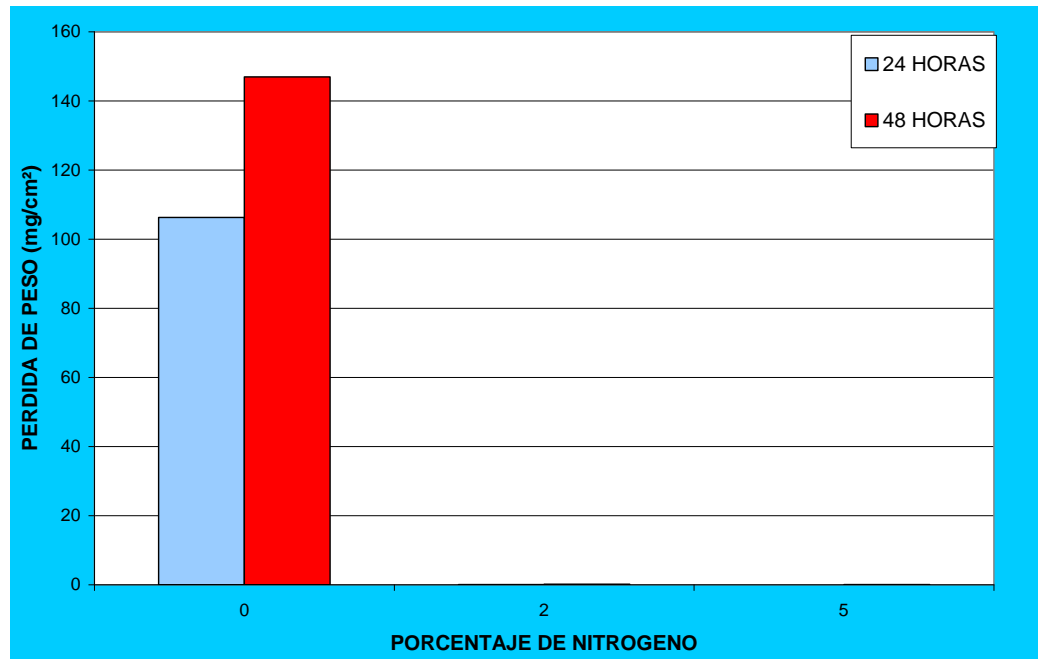


Grafico 7.3. Comparación de la pérdida de peso entre las tres Condiciones de soldeo

Se observa del grafico que las probetas protegidas con argón puro sufren en gran medida corrosión por picaduras, esto se debe a que la ferrita no es muy buena reteniendo al nitrógeno, el cual forma nitruros de cromo en determinadas zonas, haciendo que estas zonas sean pobres en cromo, por lo tanto más propensos a la corrosión por picaduras. Debido a la disminución de nitrógeno también se ve disminuido el índice PREN esta es la razón por la cual decae la resistencia a la corrosión por picaduras.

Se observo que las probetas protegidas con mezcla Ar-N no presentaron daño superficial, esto se debe a que el nitrógeno es un gran formador de austenita, por otro lado antes que el nitrógeno precipite como nitruros este se disuelve en la austenita y los elementos alfaenos como cromo y molibdeno se

distribuyen en la ferrita, lo cual genera un PREN casi igual entre la ferrita y la austenita.

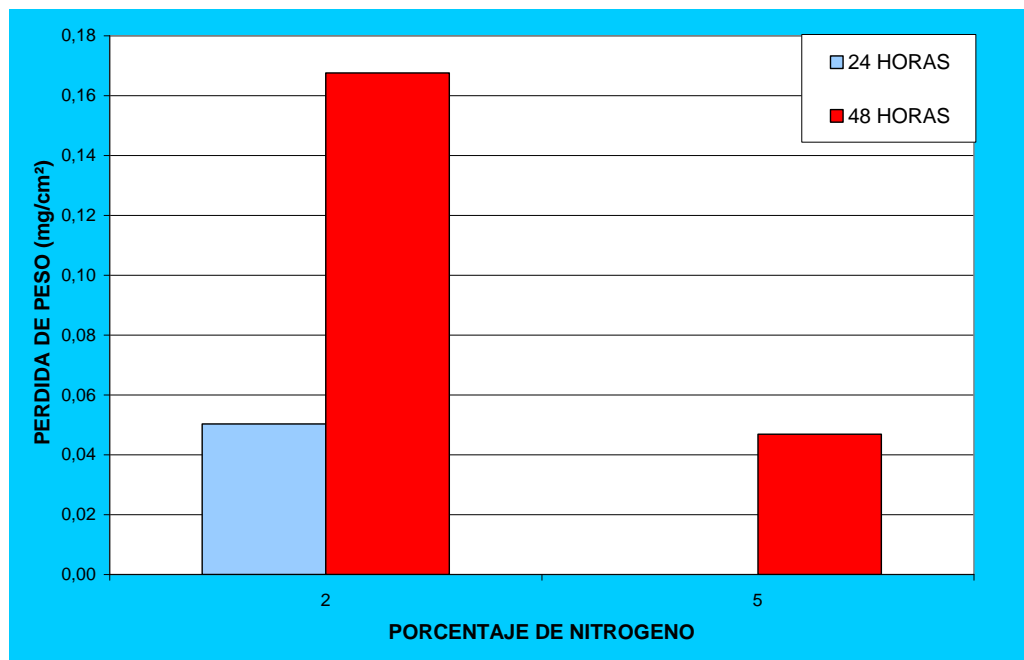


Gráfico 7.4. Comparación de la pérdida de peso entre las dos condiciones de soldeo usando nitrógeno.

Comparando pesos notamos, según los gráficos mostrados, que a mayor porcentaje de nitrógeno la resistencia a la picadura es mayor, esto es razonable ya que a mayor nitrógeno en el ambiente de protección se espera que mayor sea la difusión de nitrógeno en el material durante la soldadura. Así a mayor porcentaje de nitrógeno en el material habrá un mayor índice PREN lo cual hará a este más resistente a la corrosión por picaduras.

A las 48 horas de sumergidas las probetas, la corrosión continuaba.

CONCLUSIONES

- El nitrógeno que se añade en el gas de protección, para las condiciones dadas en este estudio, tiene un efecto estabilizador de la austenita a temperatura ambiente ver figura 7.3. Este es el caso de las condiciones 2 (98% Ar – 2% N) y 3 (95% Ar – 5% N).
- Para las condiciones de este estudio, inmersión en cloruro férrico y temperatura ambiente (20 °C), a más nitrógeno en el gas de protección se obtiene mayor resistencia a la corrosión por picaduras ver grafica 7.3 y 7.4. La condición 3 (95% Ar - 5% N) es la muestra que mas resiste a este tipo de corrosión.
- Una microestructura con alto contenido de ferrita presenta baja resistencia a la corrosión por picaduras como puede apreciarse en la figura 7.4. En la presente, la condición 1 (100% Ar) es la que presenta alto contenido de ferrita.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda probar con porcentajes mayores a 5% de nitrógeno para poder determinar hasta qué punto es beneficioso, esto para incrementar la resistencia a la corrosión por picaduras.
2. Se recomienda hacer otro estudio que haga pruebas mecánicas, tracción, dobléz, impacto y otros para verificar la relación de estas propiedades con las condiciones de este estudio.

BIBLIOGRAFÍA

1. David Talbot, James Talbot, Corrosion Science and Technology. 1998
2. Cesol. Aceros Inoxidables, proceso TIG y gases de protección. 2006
3. Fosca Pastor, Carlos. Fundamentos de la Corrosión para Ingenieros. 2004.
4. International Molybdenum Association. Guidelines for the fabrication of Dúplex Stainless Steels. 2001
5. ASN International, the materials information society. Corrosion of Weldments, USA, diciembre 2006.
6. P. Lacombe, B. Baroux, G. Beranger. “stainless Steels”, Les editions de Physique Les Ulis. 1993
7. ASM Specialty Handbook: Stainless steels. Davis, J. R., ed. Materials Park, OH: ASM International. 1994.
8. OUTO KUMPU. Dúplex Stainless Steel. Noviembre 2005
9. J. M. Gómez de Salazar, A. Ureña, M. Jesús Álvarez. Soldeo Tig de un acero inoxidable dúplex Uranus 45N: Variaciones microestructurales y propiedades, Soldadura, Vol. Abril-Junio, 1997
10. Material de estudio de la Maestría en Ingeniería de soldadura de la PUCP. Los aceros inoxidables dúplex. 2007

11. Norma ASTM G48-00 Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride solution, 2004
12. Norma ASTM A 380-99 Standard Practice for Cleaning, Descaling, and Passivation of Stainless Steel Parts, Equipment, and Systems. 2004
13. Norma ASTM A967-99 Standard Specification for Chemical Passivation Treatments for Stainless Steel Parts. 2004
14. Fosca Pastor, Carlos “Influencia de la fase sigma sobre la resistencia a la corrosión por picadura de aceros inoxidable dúplex y su caracterización electroquímica mediante la técnica “EPR”, Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid. 1995.
15. AVESTA WELDING. Como soldar aceros inoxidable dúplex. 2008
16. Norma ASTM A240 Standard Specification for Heat-Resisting Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels. 2004
17. ATI Allegheny Ludlum. ATI 2102™, Technical Data Sheet. 2009
18. M. P. Rodríguez, J. F. Almagro, J. Botella, P. Valerga. Artículo “Cinéticas de transformación de fases a 850 °C de aceros inoxidable dúplex clásicos (2205 y 2507) y de uno nuevo de bajo contenido en níquel y alto en manganeso (DBNi)”. 2004
19. OUTO KUMPU. Duplex stainless steel for storage tanks. Marzo 2007
20. http://www.nickelinstitute.org/index.cfm/ci_id/14308/la_id/12.htm
21. [http://www.plataformasinc.es/index.php/esl/imagenes/inicio/\(imagen\)/1745/\(offset_imagenes\)/365](http://www.plataformasinc.es/index.php/esl/imagenes/inicio/(imagen)/1745/(offset_imagenes)/365)