

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**EFFECTO DEL CALOR DE ENTRADA EN EL DESARROLLO
MICROESTRUCTURAL EN UNIONES LDSS/SDSS MEDIANTE EL PROCESO
GTAW MANUAL**

POR

I.Q. FÉLIX ALEJANDRO VILLACOBOS CASTILLA

MONOGRAFÍA

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

SALTILLO COAHUILA, A 30 DE OCTUBRE DE 2020

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**EFFECTO DEL CALOR DE ENTRADA EN EL DESARROLLO
MICROESTRUCTURAL EN UNIONES LDSS/SDSS MEDIANTE EL PROCESO
GTAW MANUAL**

POR

I.Q. FÉLIX ALEJANDRO VILLACOBOS CASTILLA

MONOGRAFÍA

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

SALTILLO COAHUILA, A 30 DE OCTUBRE DE 2020

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales
Gerencia de Desarrollo Humano
División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Monografía “**EFFECTO DEL CALOR DE ENTRADA EN EL DESARROLLO MICROESTRUCTURAL EN UNIONES LDSS/SDSS MEDIANTE EL PROCESO GTAW MANUAL**” realizada por el alumno (a) **FÉLIX ALEJANDRO VILLACOBOS CASTILLA** con número de matrícula **19ES-265** sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

Mtro. Bryan Ramiro Rodríguez Vargas
Tutor Académico

Dra. Argelia Fabiola Miranda Pérez
Asesora

Mtra. Cindy Estefanía Morales Bazaldúa
Asesora

Vo.Bo.
Dr. Pedro Pérez Villanueva
Coordinador de Posgrado

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales

Gerencia de Desarrollo Humano

División de Estudios de Posgrado

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de especialización del alumno **FÉLIX ALEJANDRO VILLACOBOS CASTILLA**, una vez leída y revisada la Monografía titulada **EFFECTO DEL CALOR DE ENTRADA EN EL DESARROLLO MICROESTRUCTURAL EN UNIONES LDSS/SDSS MEDIANTE EL PROCESO GTAW MANUAL**, aceptamos que la referida monografía revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa de la monografía correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 30 días del octubre del 2020.

Dra. Lilia Cruz Ventura Hernández
Presidenta

Mtro. Miguel Ángel Carrizalez Vázquez
Secretario

Mtro. Bryan Ramiro Rodríguez Vargas
Vocal

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Yo, **Félix Alejandro Villacobos Castilla**, estudiante con matrícula **19ES-265**, del Programa de Posgrado **Especialidad en Tecnología de la Soldadura Industrial** de la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V. (COMIMSA), declaro que el presente trabajo terminal con título **EFFECTO DEL CALOR DE ENTRADA EN EL DESARROLLO MICROESTRUCTURAL EN UNIONES LDSS/SDSS MEDIANTE EL PROCESO GTAW MANUAL** es original, de mi autoría y producto de mi contribución intelectual y de investigación.

Así mismo, manifiesto que los datos, imágenes y textos tomados de fuentes publicadas, como artículos y tesis, están debidamente citados y referenciados, dando el crédito a los investigadores y fuentes originales.

I.Q. Félix Alejandro Villacobos Castilla

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi gratitud a mi familia, mis padres Félix Villacobos y María Eugenia Castilla que me permitieron los estudios que en la actualidad conforman parte de mi persona y a su apoyo en las decisiones que he tomado a lo largo de mi vida, siendo el transcurso de esta especialización una de ellas. Agradezco a Dios por los días que me ha permitido continuar desarrollándome como persona y aprendiendo cosas nuevas, así como por permitirme ver la realización de mis esfuerzos en cada una de las etapas académicas de mi vida.

Le doy las gracias al Mtro. Bryan Ramiro Rodríguez Vargas cuya influencia me hizo tomar la decisión de hacer un posgrado donde su excelente papel como tutor me beneficio tanto como estudiante, así como persona e hizo de mi experiencia como estudiante algo positivo en mi desarrollo profesional. Dirijo mi gratitud a la Mtra. Cindy Estefanía Morales Bazaldúa y a la Dra. Argelia Fabiola Miranda Pérez cuyo asesoramiento y revisión del presente documento como parte del comité tutorial de este proyecto me encamino a aprovechar los recursos que se me brindaron en la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales gracias a su programa de posgrados y beca otorgada. También se agradece a CONACYT por la beca otorgada con CVU 1012835.

Finalmente agradezco a mis amigos José Margil y José Cortés que me han acompañado en mis estudios desde la carrera, así como a mis compañeros

de especialidad cuyas vivencias, experiencia laboral y consejo me resulto muy provechoso en mi toma de decisiones durante la Especialidad.

DEDICATORIA

A mi familia

Quienes me encaminaron a siempre superarme y alcanzar la meta sin importar
cuán lejos se encuentre esta

A mis maestros

A aquellos maestros que me dieron parte de su tiempo para darme el
conocimiento y las herramientas para desenvolverme en el campo laboral al
que aspiro llegar

A Dios

Por permitirme estar de pie sin importar cuán grande fuera el reto, siempre
confiando en que el camino que recorro es el correcto

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	i
DEDICATORIA.....	iii
ÍNDICE.....	iv
SÍNTESIS.....	1
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	3
1.1 Antecedentes.....	3
1.2 Objetivos.....	5
1.2.1 Objetivos general.....	5
1.2.2 Objetivos específicos.....	5
1.3 Justificación.....	5
1.4 Planteamiento del problema.....	6
1.5 Aportación tecnológica.....	6
1.6 Alcance y Delimitaciones.....	7
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 Definición de acero inoxidable.....	8
2.1.1 Clasificación de los aceros inoxidables.....	9
2.2 Aceros inoxidables dúplex.....	10
2.2.1 Definición.....	10
2.2.2 Composición química.....	11
2.2.3 Clasificación.....	13
2.2.4 Metalurgia física.....	14
2.2.5 Propiedades mecánicas.....	17
2.2.6 Aplicaciones.....	19
2.3 Proceso de soldadura GTAW.....	20
2.3.1 Generalidades y funcionamiento.....	20
2.3.2 Componentes del proceso.....	21
2.3.3 Variables del proceso.....	22
2.3.4 Limitaciones del proceso.....	24

2.3.5 Ventajas de la soldadura producida por el proceso GTAW.....	24
CAPÍTULO 3 ESTADO DEL ARTE.....	25
3.1 Efecto térmico en uniones de acero inoxidable dúplex mediante el proceso GTAW.....	25
3.2 Evolución microestructural y adición de elementos en uniones de acero inoxidable dúplex mediante el proceso GTAW.....	32
3.2.1 Análisis del porcentaje de fases.....	38
CAPÍTULO 4 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE.....	43
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES.....	46
BIBLIOGRAFÍA.....	49
ÍNDICE DE FIGURAS.....	52
ÍNDICE DE TABLAS.....	53

SÍNTESIS

Dentro de las áreas de oportunidad en el empleo de aceros inoxidable y uniones soldadas de estos aceros, existen sectores industriales cuyos requerimientos solo pueden cumplirse haciendo uso de una gama más selecta de aceros inoxidable siendo las más destacada la familia de los aceros inoxidable dúplex. Las industrias cuyas operaciones o condiciones de trabajo requieren de la exposición prolongada de los equipos y estructuras de construcción a medios ácidos o altamente corrosivos tienen una alta demanda en aceros inoxidable dúplex debido a su largo tiempo de vida útil en ambientes corrosivos como lo serían los de las plantas petroquímicas, sistemas de descontaminación, aplicaciones con agua salina, equipos para la producción de sal, la industria de la pulpa de papel, entre otros.

La característica más destacable y que debe el empleo de los aceros dúplex en el mercado es su alta resistencia a la corrosión por picaduras, característica aunada a una proporción microestructural aproximada al 50% de ferrita y 50% de austenita cuya obtención deriva de un proceso de elaboración del material con estándares de calidad elevados, así como de control rigurosos del proceso de fabricación resultando en un material con valor agregado muy elevado o alto precio de venta. Actualmente uno de los procesos de soldadura con mejores resultados en uniones de aceros inoxidable, especialmente en materiales de bajo espesor, es el proceso GTAW.

La presente investigación tiene el objetivo de estudiar el desarrollo microestructural de los aceros lean dúplex 2304 y súper dúplex 2507 al ser expuestos a una fuente de calor proporcionada por el proceso de soldadura GTAW. El comportamiento microestructural fue estudiado acorde a la variación de la entrada de calor sobre el material a soldar y las estructuras resultantes en la zona de soldadura y zona afectada por el calor para los diversos casos de las investigaciones que resultaron de interés.

Entre otros puntos de interés se obtuvo información de estudios enfocados en el uso de materiales de aporte, variación del gas de protección, adición de elementos aleantes y uso de gases activos, donde los resultados de interés presentaron principalmente estructuras austenita-ferrita, pero con variación en sus proporciones y morfología, así como la adición de elementos aleantes generó microestructuras poco frecuentes en aceros inoxidable.

Un punto clave en el estudio de los aceros dúplex es el análisis del porcentaje de fases ya que este determina la resistencia a la corrosión por picaduras del material y es importante identificar la formación de fases perjudiciales que reducen la resistencia a la corrosión del material y que principalmente deben su origen a la generación de compuestos intermetálicos en el material por influencia de una fuente de calor.

Palabras clave: DSS, LDSS, SDSS, 2304, 2507, GTAW, ZAC, calor, %e.p.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El acero inoxidable dúplex (DSS, por sus siglas en inglés) posee una microestructura bifásica consistente en proporciones equitativas (aprox. 50/50) de fase austenita y ferrita la cual genera una mayor resistencia al agrietamiento por corrosión bajo tensión que el acero inoxidable austenítico y mejor resiliencia que el acero inoxidable ferrítico. Lo cual le provee diversas características mecánicas que los convierte en materiales atractivos para diversas aplicaciones como plantas petroquímicas, transporte de químicos, estructuras y puentes, incluso en alta mar [1].

Procesos convencionales de soldadura por fusión involucran altas temperatura de trabajo, promoviendo alteraciones microestructurales en la unión soldada, por consecuencia, pueden afectar las propiedades mecánicas del material. En la unión de aceros inoxidables dúplex este aspecto es de gran importancia, ya que su microestructura con relación volumétrica aproximada de 1:1, es susceptible a alteraciones cuando el material es sometido a ciclos térmicos como los generados por los procesos de soldadura por fusión. Es importante destacar que para mantener una alta resistencia mecánica y a la corrosión, el porcentaje de ferrita en los aceros inoxidables dúplex debe estar en proporciones de 30 - 70 % en uniones soldadas [2,3].

Una adecuada selección del proceso de soldadura, así como de sus diversos parámetros empleados en el análisis de la naturaleza microestructural de los DSS, es de suma importancia, puesto que su incorrecta determinación, suscita la presencia de porosidad, faltas de fusión, fisuras en caliente, entre otras. Para efectuar una correcta soldadura de este tipo de metales suelen emplearse metales de aporte ricos en níquel, cuya adición permite retener la estructura y propiedades del material base. Es importante mencionar que el níquel se encuentra en cantidades del 0.1% al 9% e.p. en los materiales de aporte.

El proceso GTAW (por sus siglas en inglés) o soldadura por arco y electrodo de tungsteno es un proceso de soldadura por fusión obtenido a partir del arco formado por el electrodo y el material a soldar. El proceso se emplea en conjunto a un flujo de gas protector en la zona de fusión donde este puede ser inerte o activo, además en este proceso el empleo de material de aporte es opcional acorde a la aplicación que se le dará al material soldado. El proceso GTAW es ampliamente utilizado para soldar aleaciones de cobre, aluminio, magnesio, así como aceros inoxidable y aceros al carbono; además, es una de las tecnologías de unión más utilizadas para soldar aceros inoxidable dúplex ya que es capaz de producir uniones de alta calidad que cumplen los requerimientos de eficiencia y facilidad para trabajar materiales de bajo espesor, en función de su bajo aporte térmico en comparación con otros procesos de unión convencionales [4-6].

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos general

Estudiar el comportamiento térmico presente en uniones disímiles de acero inoxidable lean dúplex 2304 (LDSS) y acero inoxidable súper dúplex (SDSS) 2507 realizadas mediante el proceso GTAW.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analizar y recopilar bibliografía sobre el efecto térmico del proceso GTAW en aceros inoxidables dúplex.
- Estudiar las características microestructurales tanto del metal base, así como de las uniones realizadas de acuerdo con la literatura revisada.
- Inquirir el efecto del calor de entrada en la proporción bifásica ferrita/austenita en las diversas zonas de las uniones.
- Estudiar el comportamiento de la dureza y la microestructura en los aceros dúplex.

1.3 Justificación

A nivel industrial, se realizan uniones con materiales de composición química y propiedades mecánicas similares, sin embargo, existen aplicaciones en las que las soldaduras deben efectuarse en materiales de diferente composición en función de diversos fenómenos de desgaste mecánico, alta temperatura, u otras condiciones a las que va a estar sometido el producto final.

El empleo de uniones disímiles es de amplia utilidad en aplicaciones como calderas, recuperadores de calor, turbinas e intercambiadores; lo cual demanda la selección cuidadosa de procesos de soldadura y su método de aplicación de metales de aporte, atmósferas protectoras, entre otros que, propicien el mantenimiento o mejora de las características mecánicas y microestructurales de la pieza de trabajo.

La unión efectuada entre LDSS y SDSS se fundamenta en la necesidad de la búsqueda de materiales que cumplan con ciertas características mecánicas aptas para satisfacer los requerimientos de la industria en aplicaciones que someten al material a efectos de corrosión, abrasión, fatiga y continua expansión térmica, no obstante, es fundamental estudiar y analizar el efecto de los parámetros del proceso a emplear en función de los efectos del ciclo térmico del método de unión sobre la microestructura y propiedades mecánicas del material.

1.4 Planteamiento del problema

El empleo de aceros dúplex en aplicaciones de soldadura requiere un control de las variables del proceso que permita mantener la proporción bifásica característica de estos materiales. En el área de juntas soldadas de bajo espesor el proceso GTAW es ampliamente recomendado ya que permite un mayor control del calor de entrada en comparación con otros procesos de arco. Sin embargo, el efecto térmico que generan los parámetros del proceso en las soldaduras influye directamente en los diversos cambios que se presentan en el material, siendo necesario el análisis de la entrada de calor para la predicción del comportamiento mecánico y microestructural de las uniones.

1.5 Aportación tecnológica

La investigación proporcionará información tecnológica respecto al empleo del proceso de soldadura GTAW en la unión disímil de placas de bajo espesor de aceros inoxidable dúplex 2304 y 2507, que contribuya a la selección adecuada de los parámetros del proceso basada en la entrada de calor para mantener la dualidad de fases de ambos aceros.

Además, el conocimiento generado contribuirá en las diversas industrias que emplean este tipo de aceros inoxidable dúplex en la fabricación de sus productos, aunado a que un mejor manejo de los parámetros del proceso será capaz de reducir el consumo energético en la manufactura de estos materiales.

1.6 Alcance y Delimitaciones

El alcance de esta investigación es la recopilación bibliográfica y análisis de las fuentes para el estudio del efecto microestructural del calor de entrada del proceso de soldadura GTAW manual en la unión disímil de placas de acero inoxidable lean dúplex 2304 y súper dúplex 2507.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1 Definición de acero inoxidable

Se define a los aceros inoxidables (SS, por sus siglas en inglés) como aquellas aleaciones férreas (base hierro, cromo y carbono) con un contenido de cromo con proporción mínima del 10.5% e.p. además de elementos aleantes, como níquel, molibdeno y manganeso donde cada elemento produce variaciones en las características intrínsecas de los diversos tipos de acero que se utilizan en los distintos sectores de la industria.

La capacidad de los aceros dúplex para formar una capa pasiva de óxido de cromo (Cr_2O_3) o cromita les confiere una alta resistencia a la corrosión por picadura, donde dicha capa protege al acero y a su vez es capaz de reestablecerse en el material si el medio permite la continua oxidación del material [6].

2.1.1 Clasificación de los aceros inoxidables

Los aceros inoxidables comúnmente se clasifican por su estructura cristalográfica o microestructura del material y se clasifican principalmente en 5 tipos:

- i. Austeníticos (ASS, por sus siglas en inglés)
- ii. Ferríticos (FSS, por sus siglas en inglés)
- iii. Martensíticos (MSS, por sus siglas en inglés)
- iv. Doble fase o dúplex (DSS, por sus siglas en inglés)
- v. Endurecidos por precipitación

La **Tabla 2.1** muestra las características generales de los 5 aceros mencionados [6].

Tabla 2.1 Clasificación de los aceros inoxidable [6]

	FSS	ASS	MSS	DSS	Endurecidos por precipitación
Soldabilidad	+	++++	+	+++	+++
Resistencia a la corrosión	++	+++	++	++++	++
Velocidad de endurecimiento	++	++++	++	++	++
Resistencia a altas temperaturas	+++	++++	+	+	+
Resistencia a bajas temperaturas	+	++++	+	++	++

Baja:+

Media:++

Alta:+++

Muy alta:++++

2.2 Aceros inoxidable dúplex

2.2.1 Definición

Los DSS son aleaciones conformadas principalmente por ferrita y austenita en proporciones similares, dicha integridad es alcanzada en la fabricación de estos aceros debido a los elementos constituyentes que conforman la aleación en conjunto a algún tratamiento térmico. Los elementos que se adicionan al hierro en los DSS tienen como propósito estabilizar las fases austenita y ferrita en cierta proporción de manera que el material adquiera una alta resistencia a la corrosión, estos elementos principalmente son cromo, níquel, cobre, nitrógeno y molibdeno [7].

Estos materiales son altamente soldables a la vez que son fáciles de conformar, además comparados con los ASS cuentan con un mejor desempeño en ambientes agresivos o expuestos a iones cloruro [8].

Los DSS se emplean principalmente en industrias donde los materiales sufren una rápida degradación tal como en las industrias petroquímica y del papel. El grado de aleación de los DSS determinara el área o sector industrial en el que podrán ser empleados y el tiempo de vida útil que tendrán estos materiales según su uso y aplicación [9].

2.2.2 Composición química

Los DSS poseen una matriz ferrítica en la se encuentran dispersas islas de fase austenita, donde ambas fases conjuntas hacen de estos materiales resistentes al impacto. La cantidad de ferrita determinará la resistencia a la corrosión del material, pero en exceso puede reducir la ductilidad del material, la austenita por el contrario en grandes cantidades hará al material más dúctil y reducirá la resistencia a la corrosión.

En estos aceros el contenido de carbono es bajo y comúnmente se clasifican en base a su contenido de cromo y níquel, donde el contenido de cromo se encuentra entre 18 y 28 %e.p. y el de níquel entre 2.5 y 8%e.p., sin embargo, en la actualidad el contenido de níquel se ha visto sustituido por la adición de nitrógeno en estos aceros para estabilizar la fase austenita [10].

2.2.2.1 Efecto de los elementos aleantes

Los aceros inoxidable poseen propiedades para aplicaciones específicas según su composición química. En la **Tabla 2.2** se observa el efecto que causan los elementos de aleación en el acero.

Tabla 2.2 Efectos de los elementos aleantes en aceros [11]

	Cr	Ni	Ti	Mo	Se	S	Cu	Al	Mn	N	C	Nb	W
Mejora en la maquinabilidad					*	*							
Incremento en la dureza				*			*	*					
Aumento de la formabilidad y soldabilidad	*	*											
Incrementa las propiedades mecánicas									*	*	*		
Disminuye la corrosión intergranular			*									*	*
Incrementa la resistencia a la corrosión	*	*	*	*									

El efecto del níquel en los aceros inoxidables dúplex es de especial interés debido a sus cualidades como elemento estabilizador. En orden de mantener la cantidad de ferrita entre el 40-60%, el acero debe ser balanceado con elementos estabilizadores de la fase austenita como el níquel, el cual favorece la transición de la estructura cristalina del acero inoxidable de cúbica centrada en el cuerpo (BCC, por sus siglas en inglés) a cúbica centrada en las caras (FCC, por sus siglas en inglés). El porcentaje de éste en el acero dependerá del contenido de cromo. El níquel no tiene un efecto directo sobre las propiedades anticorrosivas, siendo su función principal controlar el balance de fases [12,13].

2.2.3 Clasificación

Los DSS son una familia de aceros cuya clasificación más usual es obtenida de acuerdo con su composición química, empleando el cálculo de resistencia a la corrosión por picaduras PRE (por sus siglas en inglés). Algunas veces llamado PRE_N debido a la consideración del contenido de nitrógeno.

La fórmula empírica para conocer dicho número en función del porcentaje en peso de los elementos constituyentes que aumentan la resistencia a la corrosión es la siguiente:

$$PRE_N = \%e.p.Cr + 3.3\% e.p.Mo + 16\% e.p.N$$

Ecuación 1

De acuerdo con los valores obtenidos mediante la expresión anterior existen cuatros grupos en los cuales pueden ser organizados los aceros inoxidable dúplex:

Aceros inoxidable lean dúplex (LDSS, por sus siglas en inglés): aceros con menor contenido de níquel y molibdeno, y altas cantidades de manganeso y nitrógeno. Valores de $PRE_N < 30$

Aceros inoxidable dúplex estándar (DSS, por sus siglas en inglés): comúnmente poseen un contenido de cromo del 22% y 5% e.p. de níquel. Alrededor del 80% del uso de los aceros inoxidable dúplex se centra en esta clase debido a su bajo costo, alta disponibilidad y amplias propiedades mecánicas. Valores de PRE_N 30-38.

Aceros inoxidable súper dúplex e híper dúplex (SDSS y HDSS, por sus siglas en inglés): aceros con adiciones de cobre y tungsteno para incrementar la resistencia a la corrosión en medios ácidos. El alto contenido de elementos aleantes propicia que su costo se eleve, sin embargo, es justificado por las propiedades que presenta [13].

2.2.4 Metalurgia física

Los DSS son fabricados a partir de una solución líquida que solidifica en ferrita a partir de la cual el material transforma de manera incompleta una vez la temperatura cae por debajo de los 1000°C, según corresponda la composición de la aleación. En la **Figura 2.1** se observa la formación de la austenita a partir de la ferrita en los DSS, sin embargo, a temperaturas más bajas se forman posibles fases secundarias y/o compuestos intermetálicos que se pueden eliminar o reducir mediante la aplicación de tratamientos térmicos posteriores. Las cantidades relativas de ferrita “ α ” (considerada ferrita δ si su solidificación es previa a la austenita) y austenita “ γ ” dependen en gran medida de la composición e historial térmico del DSS a emplear [14].

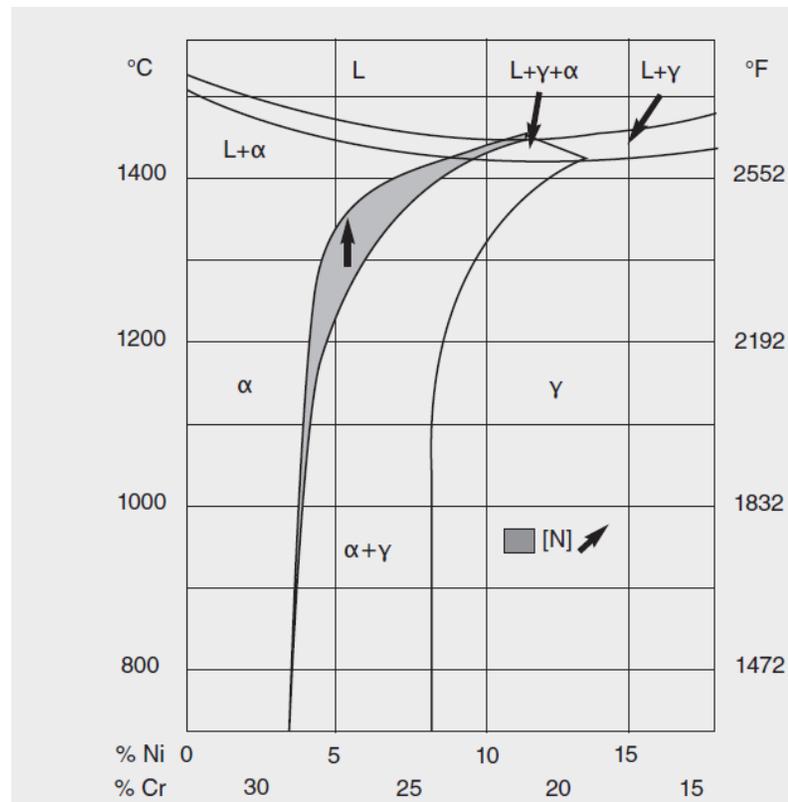


Figura 2.1 Diagrama de fases ternario para un DSS Fe-Cr-Ni con 68% de Fe [15]

2.2.4.1 Transformaciones en estado sólido

La reducción de propiedades en los DSS se debe principalmente a la aparición de fases perjudiciales o transformaciones microestructurales a partir de la ferrita ocasionadas por la aplicación de fuentes de calor durante la soldadura y elaboración de estos aceros.

La aparición de fases en los DSS ocurre debido a la difusión de los elementos aleantes en el material en donde estos difunden con mayor facilidad en la ferrita que en la austenita. Entre las fases perjudiciales que se forman en los DSS existen varios compuestos intermetálicos con cromo y molibdeno que causan fragilidad del material, además bajas temperaturas las cuales reducen la solubilidad de elementos como W, C, N y Cu lo que puede generar precipitados al aplicarse un tratamiento térmico.

Entre las fases perjudiciales que se pueden formar en los DSS están las siguientes:

1. Con altas temperaturas: carburos M_7C_3 y $M_{23}C_6$, fase sigma σ , fase chi χ , nitruros de cromo CrN y Cr_2N , y austenita secundaria γ'
2. Con bajas temperaturas: fase π , fase τ fase R, alfa prima α' , fase ϵ y G.

Fase sigma σ (Fe-Cr-Mo): Fase intermetálica con contenidos de 14% a 90% de cromo e.p. Esta fase depende en gran medida de las temperaturas de enfriamiento del material y es el intermetálico más común en los aceros inoxidable. Es una fase que se forma a temperaturas entre los 600 y 1000°C y se ubica en los límites de la ferrita con la austenita. Su estructura es de tipo tetragonal y reduce la tenacidad y resistencia a la corrosión de los DSS.

Fase chi χ (Fe₃₆Cr₁₂Mo₁₀): Fase generada en un rango de los 700 a 900°C y que cuenta con características similares a la fase sigma formándose en los límites de la ferrita con la austenita y teniendo estructura BCC, sin embargo su aparición va aunada a altos contenidos de molibdeno en el material. Su presencia

comúnmente va acompañada de la fase sigma reduciendo tenacidad tanto como resistencia a la corrosión en los DSS.

Carburos: Si se tienen altos contenidos de carbono y ausencia de N con temperaturas de 650 a 950°C se propicia la aparición de carburos M_7C_3 y $M_{23}C_6$ con estructura característica FCC y se forma en los límites de fases.

Nitruros de cromo (Cr_2N): Se obtiene como un precipitado en los bordes de grano de la ferrita debido a una alta presencia de N y exposición prolongada a temperaturas de 1040°C teniendo estructura de tipo tetragonal. También es posible obtener esta fase a temperatura entre 600 y 1000°C si el material es recocido por un largo tiempo. La formación de nitruros se ve reducida con la disminución de elementos aleantes en el material. Los nitruros perjudican la tenacidad, ductilidad y la resistencia a la corrosión de los DSS.

Fase R (34% Mo, 31% Fe, 25% Cr, 6% Ni, y 4% Si): Se obtiene entre 550 y 650°C con estructura tetragonal, precipita en los límites de fases debido a un alto contenido de molibdeno y también dentro de la ferrita. Esta fase aumenta la dureza, pero disminuye la tenacidad y resistencia a la corrosión.

Fase alfa prima: Se forma por debajo de los 500°C y es una fase fragilizadora. Si la ferrita es rica en cromo esta puede endurecerse por exposición a fuentes de calor. Esta fase se caracteriza por ocasionar zonas de ferrita pobres en cromo y ferrita con alto contenido de cromo.

Existen dos maneras en que puede formarse la fase α' :

1. Por nucleación a temperaturas elevadas y con altos contenidos de cromo.
2. Por descomposición espinodal si hay poco cromo y se tiene baja temperatura.

En el rango de 475°C la fase α' causa fragilización y pérdida de la tenacidad del material. Esta fase se considera la más perjudicial de las

mencionadas ya que afecta principalmente la tenacidad y resistencia a la corrosión[14].

La formación de fases perjudiciales en los aceros dúplex se observa en la **Figura 2.2**.

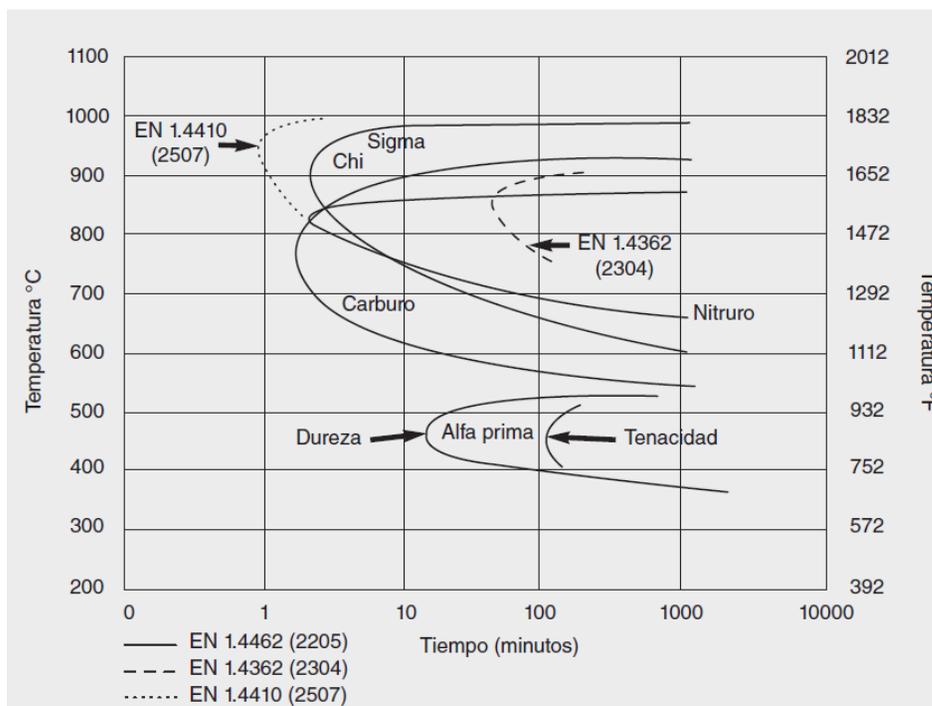


Figura 2.2 Diagrama de precipitación isotérmica para DSS 2205, 2304 y 2507 [15]

2.2.5 Propiedades mecánicas

En la **Figura 2.3** se observan propiedades mecánicas características de los DSS.

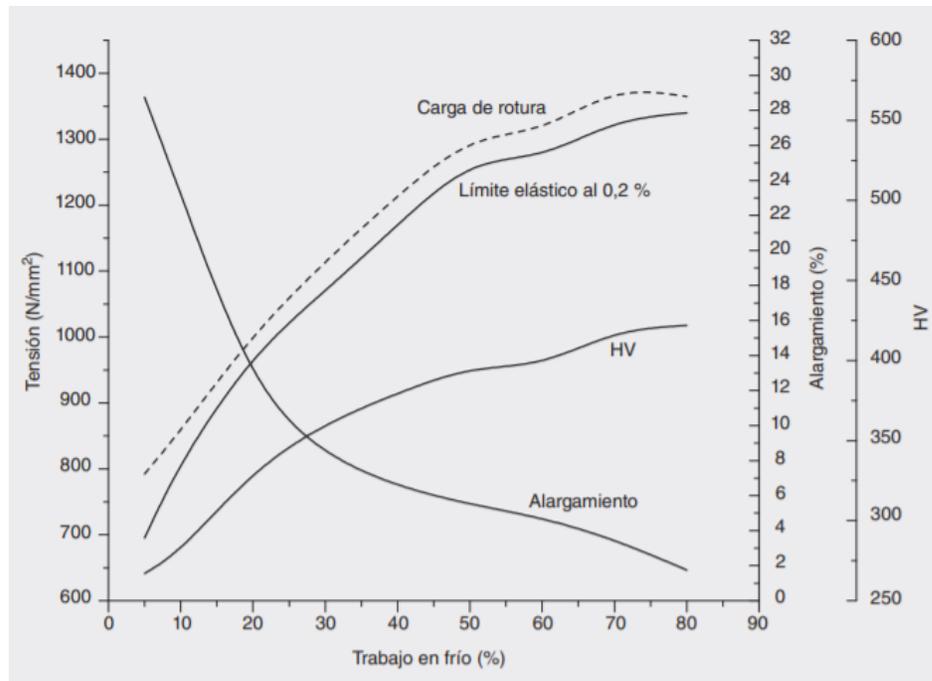


Figura 2.3 Efecto del trabajo en frío de en las propiedades mecánicas del DSS 2205 [15]

Los aceros dúplex se caracterizan por contar con una alta resistencia mecánica y resistencia a la corrosión por picaduras, estas características se atribuyen a la formación de la austenita a partir de la ferrita, generando así granos dispersos de ferrita rodeados por austenita. El tiempo de enfriamiento en la solidificación para la fabricación de los aceros dúplex es de suma importancia para obtener las proporciones adecuadas de ferrita y austenita en el material.

Aquellos aceros dúplex con un mayor contenido de cromo y nitrógeno presentan una mayor resistencia mecánica que el resto de las aleaciones de la familia de los aceros dúplex [16].

2.2.6 Aplicaciones

En industrias cuyos equipos son sometidos a ambientes con bajos niveles de pH o con alta presencia de cloruros las principales a utilizar son los ASS y DSS, sin embargo, los primeros no tienen tiempos de vida duraderos en industrias como la petroquímica y en la elaboración de la pulpa de papel, en cambio los DSS al contar con una resistencia a la corrosión intergranular superior a los ASS han sustituido a estos en varios sectores de la industria, principalmente en países de primer mundo.

Los DSS también se emplean ampliamente en equipos de purificación de aguas donde el agua con altos contenidos de sal o compuestos clorados degrada a la mayoría de los aceros convencionales permitiendo así el uso de equipos de ósmosis inversa por largos periodos de trabajo en estas condiciones. También se emplea los DSS en equipos de descontaminación de gases en fábricas, donde se generan compuestos a partir de -halógenos, siendo estos muy reactivos al contacto con el hierro del acero y sus elementos aleantes, donde los equipos fabricados con DSS pueden operar de forma eficiente bajo estas condiciones [17-21].

2.3 Proceso de soldadura GTAW

2.3.1 Generalidades y funcionamiento

El proceso de soldadura por arco de tungsteno o GTAW es un proceso mediante el cual es posible efectuar uniones entre distintas aleaciones metálicas a partir de una zona de fusión generada por un arco producto del paso de corriente en un electrodo de tungsteno no consumible y la distancia de este al metal, este proceso puede emplear material de aporte independiente a la boquilla del equipo.

Los electrodos empleados en este proceso son aleaciones de tungsteno no consumibles que se ajustan a la boquilla del equipo y al pasar corriente a través de ellos y haciendo uso de un gas ionizante, que a su vez protege la zona de unión de impurezas, formará un arco eléctrico en la zona de unión del material. El material de aporte de ser empleado en este proceso se alimentará en los bordes del charco de soldadura según la dirección de esta. En la **Figura 2.4** se puede observar el diagrama general del proceso GTAW [21].

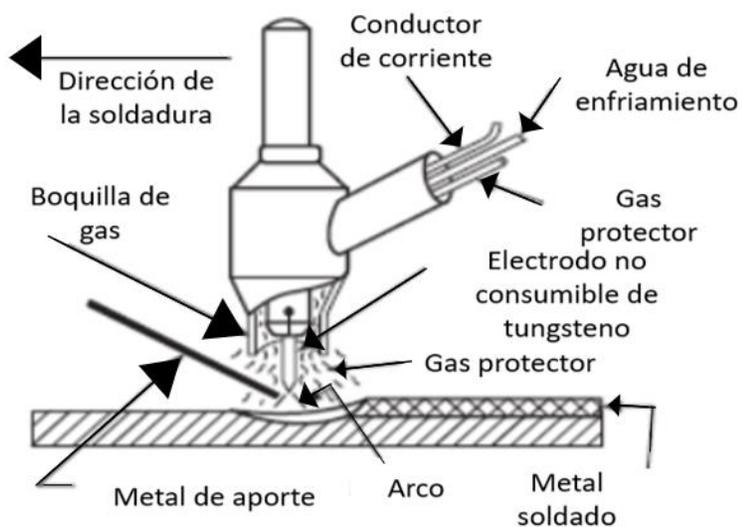


Figura 2.4 Diagrama general del proceso GTAW [21]

2.3.2 Componentes del proceso

El proceso GTAW se puede llevar a cabo mediante un equipo conformado principalmente de una fuente de energía y una antorcha o soplete, en donde el equipo puede contar con diversos controladores de voltaje e intensidad de corriente, como a su vez el equipo puede contar con alimentador de aporte.

2.3.2.1 Sopletes

El soplete como componente del proceso GTAW tiene como función principal sostener los electrodos y alimentar el flujo de gas protector, así como conducir la corriente al extremo del electrodo. Se debe usar el soplete acorde a las especificaciones de los electrodos y materiales a soldar para evitar dañar el equipo por un sobrecalentamiento de este.

2.3.2.2 Electrodo

El proceso GTAW emplea electrodos de tungsteno debido a que al ser este un proceso de fusión la zona donde se produce el arco de soldadura supera las temperaturas en que la mayoría de las aleaciones metálicas pasan al estado líquido, por lo que el tungsteno al ser un metal de gran dureza, punto de fusión aproximado de 3410°C y buen conductor eléctrico es un material apropiado para fabricar electrodos para el proceso GTAW en donde se alcanzan elevadas temperaturas y alta probabilidad de desgaste en el electrodo.

2.3.2.3 Fuentes de potencia

La principal fuente potencia empleada en este proceso es la corriente constante (CC), sin embargo, existen aplicaciones con el uso de corriente alterna (CA) por lo que varios equipos cuentan con transformadores de corriente. Existen equipos con usos más específicos que hacen uso de CC por pulsos, así como CA de onda cuadrada y sinusoidal.

2.3.2.4 Gases protectores

Los principales gases para emplear en este proceso son Ar y He ya que son gases ionizantes con buenos resultados en el arco de soldadura, además se emplean mezclas de estos gases para otro tipo de aplicaciones donde se adicionan elementos como N e H.

En materiales de bajo espesor es común emplear Ar como gas de protección debido a que esto reduce la penetración de soldadura en comparación a otras mezclas de gas y esto reduce la sobre penetración así como las principales afecciones en soldaduras verticales.

En aplicaciones de transferencia de arco por chisporroteo mediante corriente directa solo es posible usar gas Ar, debido a que dicho método no es posible de lograr en He. En las aplicaciones del proceso GTAW el Ar es el gas más empleado tanto en aplicaciones de CC y CA [23].

2.3.3 Variables del proceso

Las variables más destacables del proceso GTAW son el calor generado, intensidad de corriente, velocidad de recorrido, voltaje y gas de protección a emplear. El calor generado por el proceso depende principalmente de los valores de corriente y voltaje.

Corriente del arco

El proceso es capaz de usar corriente constante y alterna donde en ambos casos los valores la longitud del arco dependerá de los valores designados a la intensidad de corriente y voltaje para así tener un mayor control de la penetración de la soldadura.

En CC con polo negativo en el electrodo es posible obtener mayor penetración de la soldadura, especialmente si el gas protector es He. En cambio, la CA se emplea principalmente en transferencia de arco por chisporroteo con el propósito de eliminar óxidos y agentes de tipo refractario de la superficie de los

materiales, sin embargo, esto genera una punta de electrodo redondeada que DSS producirá un arco errático, por lo que este método de transferencia no se emplea en estos aceros.

Calor de entrada

En los procesos de soldadura por fusión, el calor de entrada es una medición cuantitativa de la energía transferida a los componentes a ser soldados. Se considera una medida de alto impacto ya que influye directamente en la velocidad de enfriamiento y posteriormente en la microestructura final de la unión a lo largo de las zonas de soldadura (ZS) y zona afectada por el calor (ZAC). Es importante mencionar que el desempeño mecánico de un componente metálico se encuentra asociado a su naturaleza microestructural o al historial térmico del material [22,24].

Se puede obtener valores aproximados de la cantidad de calor que ingresa al material mediante la **Ecuación 2**, limitándose al cálculo del calor de entrada en determinado momento y zona del material. Existen ecuaciones de tipo diferencial que permiten realizar cálculos de 3 dimensiones para la determinación del calor y cuyos resultados son más puntuales. La **Ecuación 3** muestra el cálculo del calor a partir del modelo empleado por Goldak, el cual fue obtenida gracias a diversos estudios y comprobaciones, y por ello ofrece resultados muy aproximados al valor real [21].

$$Q = mC_p\Delta T$$

Ecuación 2 [21]

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(k_x(T) \frac{\delta T}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(k_y(T) \frac{\delta T}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(k_z(T) \frac{\delta T}{\delta z} \right) + \bar{Q} = \rho C_p(T) \frac{\delta T}{\delta t}$$

Ecuación 3 [21]

2.3.4 Limitaciones del proceso

Entre las limitaciones del proceso GTAW se encuentran las siguientes:

1. Con el uso de aporte se deposita menos material que en procesos de electrodo consumible.
2. El uso manual del proceso GTAW requiere una mayor habilidad para su uso que otros procesos de soldadura manuales.
3. En materiales de espesores superior al centímetro los costos energéticos de elevan de manera significativa.
4. El gas protector se vuelve ineficiente en zonas abiertas o con alta ventilación [19].

2.3.5 Ventajas de la soldadura producida por el proceso GTAW

El proceso GTAW cuenta con las siguientes ventajas:

1. Genera soldaduras sin defectos y buen acabado superficial
2. El electrodo no consumible evita salpicaduras de material en la soldadura.
3. Según los requerimientos el proceso puede emplearse de manera autógena o con adición de aporte.
4. La penetración de la soldadura es fácil de controlar.
5. Capaz de obtener soldaduras autógenas a un bajo costo energético.
6. Las fuentes de potencia que requiere el equipo nos relativamente económicas.
7. El proceso puede emplearse en soldadura de todos los tipos de aleaciones férreas, así como uniones disimiles entre ellas.
8. El depósito de material de aporte se realiza de manera autónoma al soplete del equipo [19].

CAPÍTULO 3 ESTADO DEL ARTE

3.1 Efecto térmico en uniones de acero inoxidable dúplex mediante el proceso GTAW

Yousefieh y colaboradores (2011) [22] realizaron estudios acerca del efecto de las variaciones de entrada de calor en la microestructura y resistencia a la corrosión de un DSS UNS S32760 en agua de mar artificial. Se estudió la resistencia a la corrosión, en una solución 3.5% de NaCl y se encontró que la presencia de fase σ y Cr_2N disminuye el potencial de corrosión.

La muestra (Ver **Figura 3.1**) con una entrada de calor de aproximadamente 0.95 kJ/mm presentó mejor resistencia a la corrosión, cuyo resultado se obtuvo a causa de la falta de fases perjudiciales como σ y Cr_2N y su proporción equilibrada de ferrita-austenita. El resto de las muestras se estudió con entradas de calor de 0.63, 0.76 y 0.12 kJ/mm obteniendo resultados inferiores de resistencia a la corrosión.

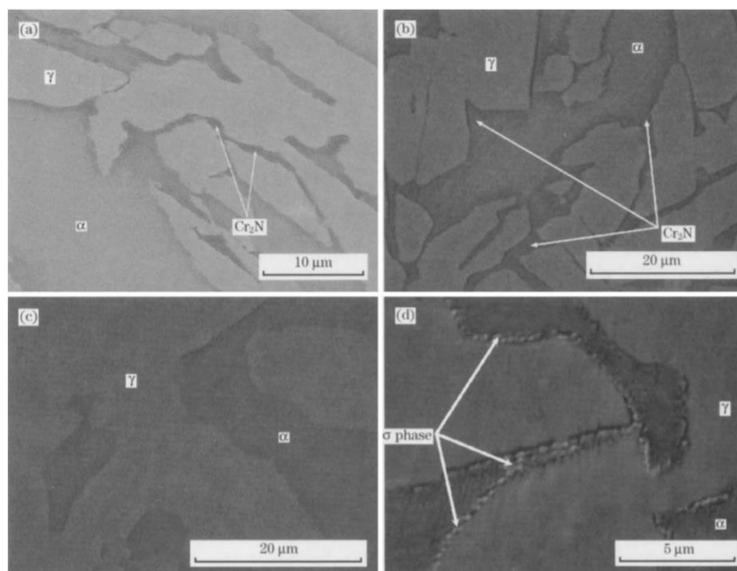


Figura 3.1 Micrografías de la soldadura [22]

Paulraj y colaboradores (2016) [23] estudiaron el efecto de los parámetros de soldadura GTAW en el comportamiento de resistencia a la corrosión en uniones multipases de aceros inoxidable DSS y SDSS. Se estudió la entrada de calor, temperatura de pases, velocidad de enfriamiento, gas de protección y purga posterior.

Debido a la entrada de calor producida por etapas se produjo un recalentamiento en el producto de la soldadura multipases. Observándose que con una baja entrada de calor (0.75-1.25 kJ/mm) se formó una microestructura deseable sin fases perjudiciales. Las soldaduras DSS tuvieron temperatura crítica de picado (CPT, por sus siglas en inglés) entre 23 °C a 27° C y las soldaduras SDSS tenían CPT entre 37° C y 41° C. Los resultados de la prueba de corrosión se correlacionaron con las microestructuras de las soldaduras concluyendo que el control adecuado de parámetros (Ver **Tabla 3.1**) permite una entrada de calor con la cual se obtiene soldaduras con buena resistencia a la corrosión.

Tabla 3.1 Parámetros de soldadura [23]

Posición de soldadura	5G
Diseño de bisel	V con 70°
A	80-150
V	10.0-12.0
Velocidad de recorrido (mm/min)	40-80
Número de pases	4.0-5.0
Flujo de gas (L/min)	13-18
Entrada de calor (kJ/mm)	0.75-1.25

Para estudiar el efecto del material de aporte en el proceso GTAW, Anbarasu y colaboradores (2019) [24] realizaron estudios en placas de acero dulce (IS 2062) con aporte súper dúplex ER2594, efectuando uniones con rangos de amperaje de 80-100 A, velocidad de 33-100 mm/min, y flujos de gas de 60-100 L/min. El resultado de la prueba de microdureza y microestructura se estudió sobre el área soldada y material base. Se analizó la influencia de cada parámetro en la dureza y propuso un modelo matemático para predecir el mismo. Las pruebas de dureza mostraron valores de 213 a 256 HV para la zona de fusión y 148-217 HV para el material base.

En base a los resultados de las uniones efectuadas mediante el proceso TIG a mayor corriente de soldadura se incrementará la dureza y se obtendrá una microestructura similar a la del material base, sin embargo, la corriente de soldadura debe tener un límite superior, por encima de ese límite defectos como penetración excesiva, bajo corte, disminución dureza y la morfología pueden variar drásticamente de manera adversa. Se concluyó que, en condiciones de soldadura con corriente de 120 A, velocidad de soldadura de 100 mm/min, así como un caudal de gas de 10 litros/min debería ser mayor la dureza lograda. Los resultados revelaron que todos los parámetros afectaron significativamente la dureza y los modelos matemáticos para predecir los resultados tuvieron un 99% de exactitud.

El equipo de investigación dirigido por Devendranath (2020) [25] estudió el comportamiento de los materiales de aporte ER80S-Ni3 y ER2553 para obtener juntas de acero inoxidable súper dúplex (SDSS) de 10 mm de espesor y acero de baja aleación de alta resistencia (HSLA) utilizando corriente continua pulsada. En la **Tabla 3.2** se muestran los parámetros empleados para ambos aceros.

Tabla 3.2 Parámetros empleados en la soldadura de SDSS y HSLA [25]

Especificación	Unidad	ER80S-Ni3	ER2553
Corriente mínima	A	110	110
Corriente máxima	A	160	160
Voltaje	V	10.2-12.3	10.5-12.7
Frecuencia	Hz	10	10
Ciclo de trabajo	%	50	50
Temperatura entre pases	°C	35-40	35.40
Número de pases	-	5	5
Diámetro de varilla	Mm	2.4	1.6
Electrodo	-	Tungsteno toriado	Tungsteno toriado
Gas protector	-	Argón	Argón
Flujo de gas	L/min	20	20
Entrada de calor al pase	kJ/mm	0.332	0.234

En las juntas obtenidas (Ver **Figura 3.2** y **Figura 3.3**), se observaron listones de martensita y bainita con austenita retenida en la microestructura de la zona de soldadura de las juntas con aporte ER80S-Ni3; mientras que la microestructura de austenita y ferrita se mantuvo en las juntas con aporte ER2553. Se observó una disminución del 19% y del 76% en la resistencia al impacto para las juntas ER2553 y ER80S-Ni3 respectivamente cuando fue operado a temperatura ambiente. Cabe destacar el bajo aporte térmico o entrada de calor con el que se logró obtener las soldaduras en conjunto de aportes ricos en cromo y níquel.

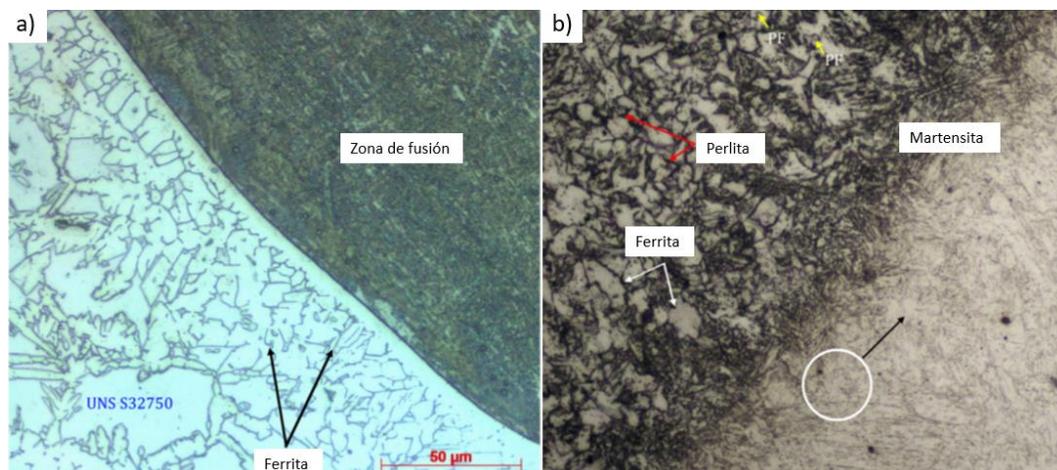


Figura 3.2 Microestructuras de interfaz en soldaduras TIG por corriente pulsada de UNS S32750 y HSLA empleando aporte ER80SNi-3 [25]

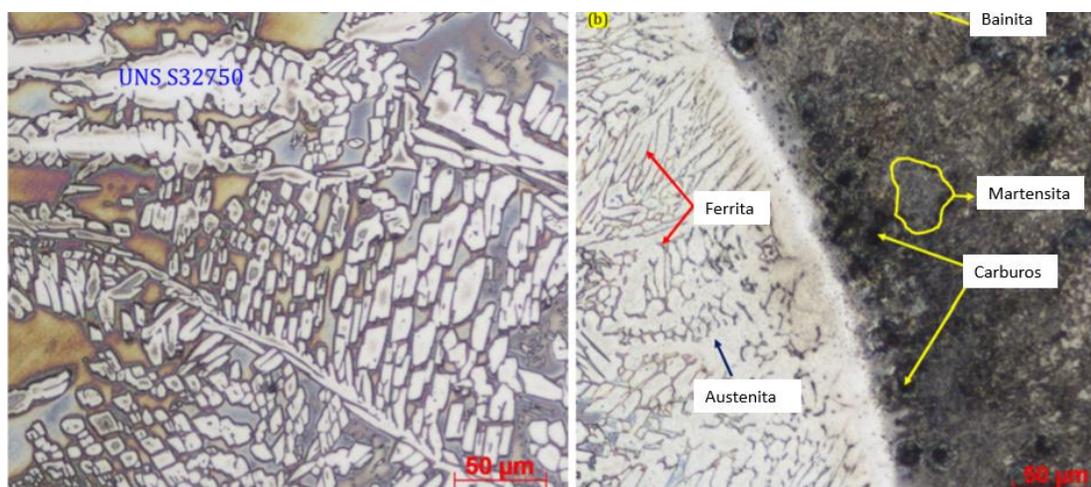


Figura 3.3 Microestructuras de interfaz en soldaduras TIG por corriente pulsada de UNS S32750 y HSLA empleando aporte ER2553 [25]

Singh y colaboradores (2019) [26] realizaron una investigación numérica y experimental para el proceso de soldadura por arco de tungsteno con gas (GTAW) aplicado en el acero AISI 304L con la finalidad de obtener la eficiencia térmica del proceso y profundidad de penetración con diferentes parámetros de soldadura. Se realizó la experimentación en placas AISI 304L de dimensiones de 300 mm X 70 mm X 10 mm efectuando juntas a tope empleando varilla sólida de 308 L de 2 mm de diámetro para soldar placas AISI 304L. Se observó que la

profundidad de la penetración aumentó conforme incrementa la corriente y el voltaje de soldadura en conjunto de la disminución de la velocidad de soldadura.

La eficiencia térmica del proceso se calcula respecto al volumen de la zona de fusión en donde una pequeña parte de la energía total es utilizada para fundir la placa y el resto de la energía se transfiere al entorno por conducción, convección y radiación. La eficiencia de fusión se ve significativamente afectada por los parámetros del proceso y la configuración de la placa a soldar, así como de las propiedades de los materiales a emplear. La eficiencia térmica máxima calculada del proceso fue de 0.44 esto obtenido a partir del perfil de temperatura sobre la placa soldada, volumen de la zona de fusión y zona afectada por el calor. Los cálculos numéricos mostraron que las mayores temperaturas se ubicaron cerca de la línea central de la soldadura.

Entre otras de las investigaciones de Devendranath (2014) [27] se encuentra la optimización de parámetros del proceso GTAW tales como corriente y velocidad de soldadura para lograr la máxima penetración en el cordón de la placa de acero inoxidable súper dúplex de forma automática.

Se determinó la penetración máxima de 3.4439 mm con una entrada de calor de 1.17 kJ/mm haciendo uso de una corriente de 250 amperios y una velocidad de soldadura de 150 mm/min. La microestructura y propiedades mecánicas de las soldaduras fueron determinadas a partir de la caracterización de las placas soldadas utilizando los parámetros óptimos establecidos. Lo anterior se puede observar en la **Figura 3.4**.

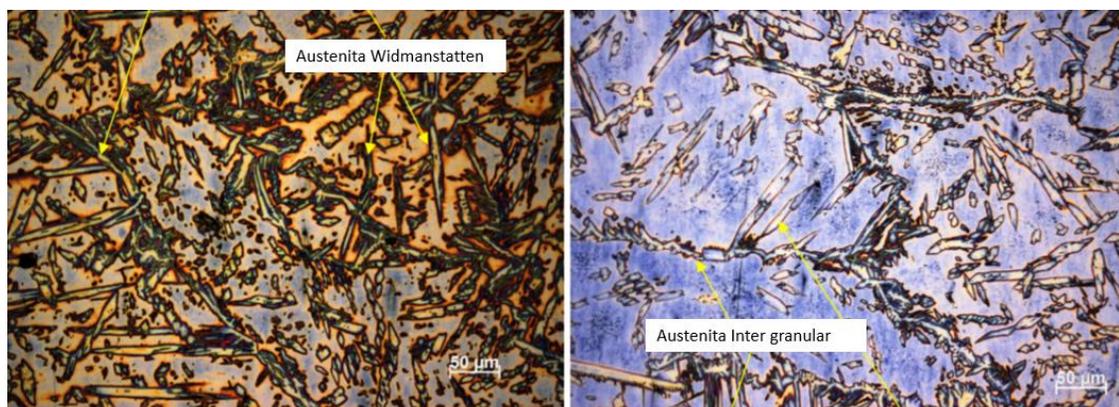


Figura 3.4 Microestructura de la zona de soldadura del UNS 32750 a 200X [27]

Los estudios de microestructura mostraron la ausencia de fases perjudiciales como sigma o precipitación de Cr_2N ; sin embargo, la zona de soldadura presentó diferentes tipos de austenita derivada de la ferrita, tales como austenita Widmanstatten, austenita de límite de grano y austenita secundaria. Los resultados mostraron que la resistencia a la tracción y la resistencia al impacto de las juntas obtenidas por proceso de GTAW autógeno fue de 851 MPa y 150 J respectivamente. Junto a todo lo anterior se concluyó que el proceso GTAW autógeno es recomendable para soldar acero UNS 32750.

Al soldar distintas juntas Sadeghian y colaboradores (2014) [28] estudiaron la microestructura y las propiedades mecánicas en uniones de acero inoxidable súper dúplex UNS S32750 y API X-65 de alta resistencia y baja aleación de acero (HSLA). Para este propósito, emplearon el proceso GTAW con dos entradas diferentes de calor: 0.506 y 0.86 kJ/mm. Los resultados mostraron un aumento en la entrada de calor lo que condujo a una disminución en el porcentaje de ferrita, y la ausencia de fases. También se indicó que en la zona afectada por el calor del metal base HSLA con baja entrada de calor se generó la presencia de fases como bainita y ferrita; y a altas entradas de calor, se propicia la aparición de perlita y ferrita.

Li e investigadores (2014) [29] sometieron un acero dúplex con contenido de cromo del 20% y 10% de níquel a un envejecimiento térmico a 400 ° C durante un tiempo de 3000 h para evaluar los efectos de la ferrita sobre los

comportamientos de envejecimiento térmico. En los DSS no envejecidos el alto contenido de ferrita es útil para mejorar las propiedades mecánicas. Después del envejecimiento la resistencia al impacto del DSS disminuyen con el aumento del contenido de ferrita. Extender el tiempo de solución en la región austenítica puede disminuir la ferrita y mejorar la distribución y la forma de las fases de ferrita y por ello un tratamiento de solución en la región austenítica durante un tiempo mayor mejora la resistencia a la fragilidad por envejecimiento térmico.

Por lo tanto, el alto contenido de ferrita es benéfico para las propiedades mecánicas de los aceros no envejecidos, sin embargo, la resistencia al impacto de los materiales envejecidos térmicamente disminuye con el contenido de ferrita. En cambio al extender el tiempo de solución en la región austenítica, las fases de ferrita se disuelven gradualmente en la austenita y la ferrita se vuelve más fina y dispersa. En los aceros inoxidable que contienen ferrita un tiempo de solución relativamente más largo aumenta la resistencia a la fragilidad por envejecimiento térmico.

3.2 Evolución microestructural y adición de elementos en uniones de acero inoxidable dúplex mediante el proceso GTAW

Wang y su equipo de investigación (2006) [30] determinaron que la velocidad de enfriamiento y un elevado subenfriamiento en la soldadura de acero dúplex 2205 afectan significativamente la microestructura de la zona de fusión en la soldadura GTAW pulsada bajo una entrada constante de calor.

Se realizaron 4 uniones con distintas condiciones de soldadura donde la unión que retuvo las propiedades del material base en mayor medida tuvo una zona de fusión que solidificó a una velocidad de enfriamiento de aproximadamente 139 ° C/s haciendo uso de N₂ líquido, donde una velocidad mayor de subenfriamiento tuvo un mayor contenido de austenita de

aproximadamente 37% en volumen. La estructura final del metal con temperatura inicial de 7°C soldado mediante GTAW pulsado presentó un alto contenido de austenita intragranular (IGA, por sus siglas en inglés) dentro de la matriz del grano ferrítico, además de austenita Widmännstätten (W) y austenita en el límite de grano (GBA, por sus siglas en inglés). Dando como resultado en la soldadura una distribución uniforme de microdureza y propiedades mecánicas homogéneas.

Pamuk e investigadores (2018) [31] estudiaron los efectos del contenido de nitrógeno y argón en la mezcla de gas de respaldo sobre la microestructura y resistencia a la corrosión por picadura en tubos de acero inoxidable dúplex soldados por arco de tungsteno con gas protector 100% Ar en acero ASTM A790 utilizando ER2209 como metal de relleno. La soldadura se realizó mediante el proceso GTAW con electrodo positivo con corriente continua, 2.4 mm de diámetro del electrodo de tungsteno toriado, ranura en V simple con espacio de raíz de 3 mm y posición 5G.

Las proporciones de gas de respaldo para este estudio fueron 100% Ar, 5% N₂ + 95% Ar, 10% N₂ + 90% Ar, 15% N₂ + 85% Ar y 100% de N₂. Para el gas protector, se usó 100% de Ar para todas las muestras utilizando los parámetros mostrados en la **Tabla 3.3**.

Tabla 3.3 Parámetros de soldadura [31]

Pases de soldadura	A	V	Velocidad de recorrido (cm/min)	Entrada de calor (kJ/mm)	Flujo de gas protector (L/min)	Flujo de gas de respaldo (L/min)
1	90-95	9.0-10.0	4.0-4.5	1.2-1.3	8	10
2	125-130	11.0-12.0	6.0-6.5	1.4-1.5	12	10
3	125-130	11.0-12.0	4.5-5.0	1.8-1.9	12	Sin gas
4	130-135	11.0-12.0	4.5-5.0	1.9-2.0	12	Sin gas
5	110-115	11.0-12.0	6.5-7.0	1.1-1.2	12	Sin gas
6	110-115	11.0-12.0	6.5-7.0	}1.1-1.2	12	Sin gas

Durante la soldadura la entrada de calor se mantuvo por debajo de 1.5 KJ/mm y la temperatura intermedia de paso no fue superior a 120° C. Después de soldar se midieron el contenido de nitrógeno, dureza, microestructura y resistencia a la corrosión por picadura. Se encontró que la fracción de volumen de ferrita obtenida del alcance de ferrita disminuyó al aumentar el contenido de nitrógeno en el gas de respaldo. El contenido de ferrita se redujo en la soldadura de raíz en comparación con la zona afectada por el calor de la mayoría de los especímenes. Esto indica que la adición de N₂ en el gas de respaldo afectó la estabilidad de la fase de austenita resultando en una fracción de volumen menor de ferrita, especialmente en el metal de soldadura. Los resultados mostraron que el potencial de picadura era más alto en la muestra soldadas con de gas 100% N₂. Además, como se observa en la **Figura 3.5**, se encontró que la presencia de austenita secundaria era más alta en muestras soldadas con gas 100% Ar y disminuyó al aumentar el contenido de nitrógeno en el gas protector.

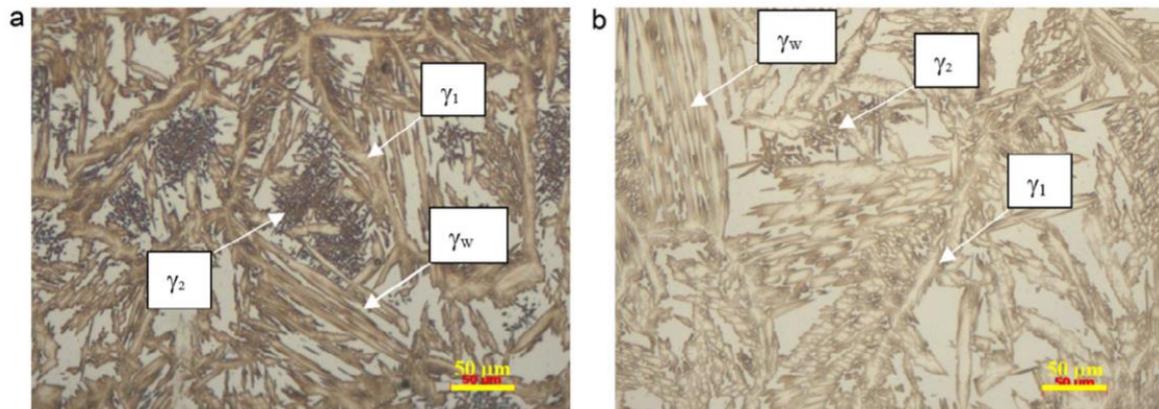


Figura 3.5 Micrografías ópticas de (a) formación de austenita secundaria en la raíz de soldadura de la muestra soldada con gas de respaldo 100% Ar; (b) formación de austenita secundaria en la raíz de soldadura de la muestra soldada con gas de respaldo 100% N₂ [31]

Mourada y colaboradores (2012) [32] realizaron un estudio comparativo sobre la influencia de la soldadura por arco de tungsteno y gas (GTAW) y el proceso de soldadura por haz láser con dióxido de carbono (LBW, por sus siglas en inglés) en el tamaño de la microestructura de la zona de fusión, propiedades

mecánicas y corrosión en uniones de placas de acero inoxidable dúplex DSS grado 2205 de 6.4 mm de espesor.

La unión mediante el proceso GTAW se realizó utilizando de corriente de 110 A, voltaje de 12 V, velocidad de soldadura de 0.15 m/min y velocidad de gas argón de 15 L/min. Mientras que los parámetros del LBW fueron: velocidad de soldadura de 0.5 m/min, distancia de desenfoque de 0.0 mm, velocidad de flujo de gas de argón de 20 L/min y potencia láser de salida máxima de 8 kW.

En comparación con el proceso GTAW, el LBW ha producido uniones soldadas con una disminución significativa en el tamaño de la zona de fusión y un perfil de soldadura aceptable. El equilibrio ferrita-austenita tanto de la soldadura como de la zona afectada por el calor (ZAC) estuvo influenciado por la entrada de calor que es una función del proceso de soldadura. El proceso GTAW obtuvo un equilibrio de ferrita-austenita cercano al del metal base debido a una mayor entrada de calor. Por lo tanto, las propiedades de las uniones soldadas están notablemente influenciadas por el tamaño de la zona de fusión en lugar del equilibrio austenita-ferrita.

La **Figura 3.6** y **Figura 3.7** muestran el cambio en la microestructura de los materiales según el proceso de soldadura empleado.

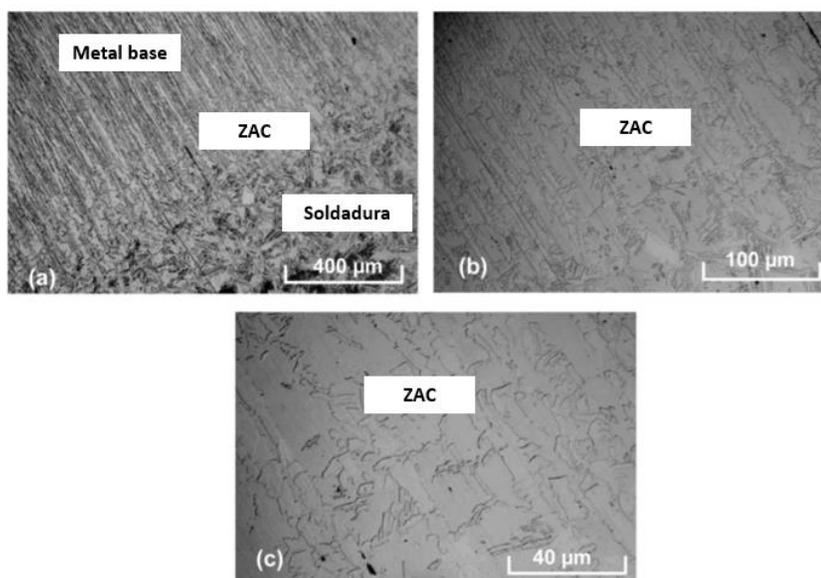


Figura 3.6 Micrografías ópticas de sección transversal de unión soldada mediante GTAW. (a) Juntas diferentes regiones (Metal base, ZAC y Soldadura) (b) y (c) Mayores aumentos para la región ZAC [32]

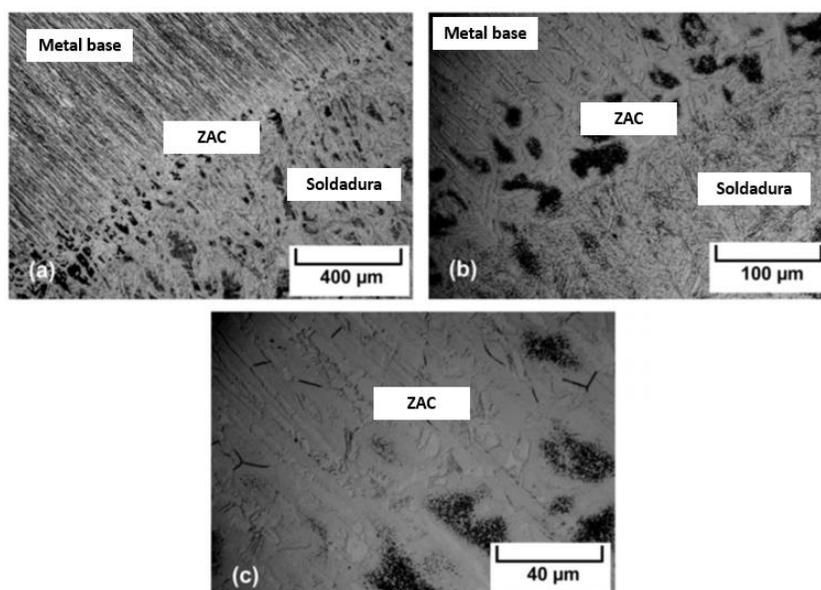


Figura 3.7 Micrografías ópticas de sección transversal de unión soldada mediante LBW. (a) y (b) Las imágenes muestran las diferentes regiones (Metal base, ZAC y Soldadura). (c) Imagen de mayor aumento para la región de la ZAC [32]

Geng y colaboradores (2015) [33] investigaron el comportamiento de la microestructura, microdureza y corrosión en cinco zonas del metal desde la

soldadura hasta el metal base de una junta de acero inoxidable dúplex 2205, que fue soldada mediante el proceso GTAW de doble paso (en el cordón de soldadura) con alambre de aporte.

Los resultados obtenidos mediante espectroscopía de energía dispersiva EDS (por sus siglas en inglés) mostraron que se obtuvo una cantidad considerable de austenita secundaria en el metal de soldadura, la cual se forma por un rápido enfriamiento del acero a temperaturas de solubilización donde la fase austenita expulsa elementos de aleación debido a la saturación de estos en la microestructura, esto debido al recalentamiento de la soldadura de segundo paso, también se formaron granos de ferrita gruesa cerca de la línea de fusión por la baja velocidad de enfriamiento, mientras que otras zonas tuvieron microestructuras similares con distintos contenidos de austenita. Las zonas analizadas tuvieron variaciones entre el 20% y 25% de Cr, 2.5% a 4.6% de Mo y 4.1 al 7% de níquel

Los valores de la microdureza variaron según el particionamiento de los elementos aleantes (Cr, Mo, Ni y N) y precipitados como el nitruro de cromo. La austenita fue más dura que la ferrita desde el metal de soldadura a la línea de fusión, mientras que se invierte de la línea de fusión al metal base. Esta tendencia en la dureza se debió a una mayor presencia de elementos formadores de segundas fases, tales como el nitruro de cromo, en la zona de fusión. Por lo que aquellas juntas con valores de %Cr semejantes al del metal base evitaron en mayor medida la formación de fases perjudiciales como los nitruros de cromo.

Westin y su equipo de investigación (2008) [34] estudiaron la influencia de los óxidos de soldadura en la resistencia a la corrosión, donde dicho efecto no se ha estudiado adecuadamente para la familia de aceros inoxidables dúplex. Las pruebas se efectuaron con espesores de 2.5 mm, 3 mm y 4 mm variando el gas protector entre 100% Ar y 98% Ar con 2% N₂, voltajes aproximados de 10.5 V, amperaje de 80 A, y velocidad promedio de recorrido de 2.2 mm/s

Se utilizó espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS) para el estudio del tinte térmico (Coloración presente en la ZAC) formado en soldaduras de arco de tungsteno y gas (GTAW) en los aceros dúplex comerciales LDSS 2101 y 2304 soldados con y sin adición de nitrógeno al gas de protección. El proceso de formación de tinte térmico se discutió en términos de fenómenos de transporte atribuyendo esta coloración en la zona afectada térmicamente por el efecto de la atmósfera, la temperatura y la composición del material. Se encontró que los óxidos formados eran ricos en manganeso y las pruebas de corrosión mostraron que el nitrógeno tuvo un alto impacto en el óxido de la soldadura.

Se determinó que los aceros ricos en níquel y manganeso promueven la alta solubilidad del nitrógeno en el charco de soldadura debido a un proceso de evaporación y deposición donde la formación de nitruros a su vez incrementa la presencia de óxidos.

3.2.1 Análisis del porcentaje de fases

Jiang y colaboradores (2013) [35] realizaron un caso de estudio para evaluar la resistencia a la corrosión por picadura en 4 uniones de acero inoxidable dúplex 2304 con diferentes valores de Cr_{eq}/Ni_{eq} mediante el proceso de soldadura PAW.

La relación Cr_{eq}/Ni_{eq} se obtuvo empleando las siguientes ecuaciones:

$$Cr_{eq} = \%e.p.Cr + \%e.p.Mo + 0.7\%e.p.Nb$$

Ecuación 4 [35]

$$Ni_{eq} = \%e.p.Ni + 35\%e.p.C + 20\%e.p.N + 0.25\%e.p.Cu$$

Ecuación 5 [35]

Las cuales parten de la ecuación para evaluar la resistencia a la corrosión por picadura PRE_N

$$PRE_N = \%e.p.Cr + 3.3\%e.p.Mo + 20\%e.p.N$$

Ecuación 6 [35]

Los resultados mostraron que cuanto menor fue el valor de Cr_{eq}/Ni_{eq} en el rango experimental, la microestructura después de soldar o al finalizar el ciclo térmico mantuvo una relación cerca al 1:1 de austenita y ferrita. Se identificó que un contenido de níquel resultante en un valor de Cr_{eq}/Ni_{eq} cercano a 2.65 en la zona de fusión propicia la presencia de austenita y ferrita en porcentajes cercanos al 50%.

En la **Figura 3.8** se puede observar las uniones efectuadas mediante el proceso PAW.

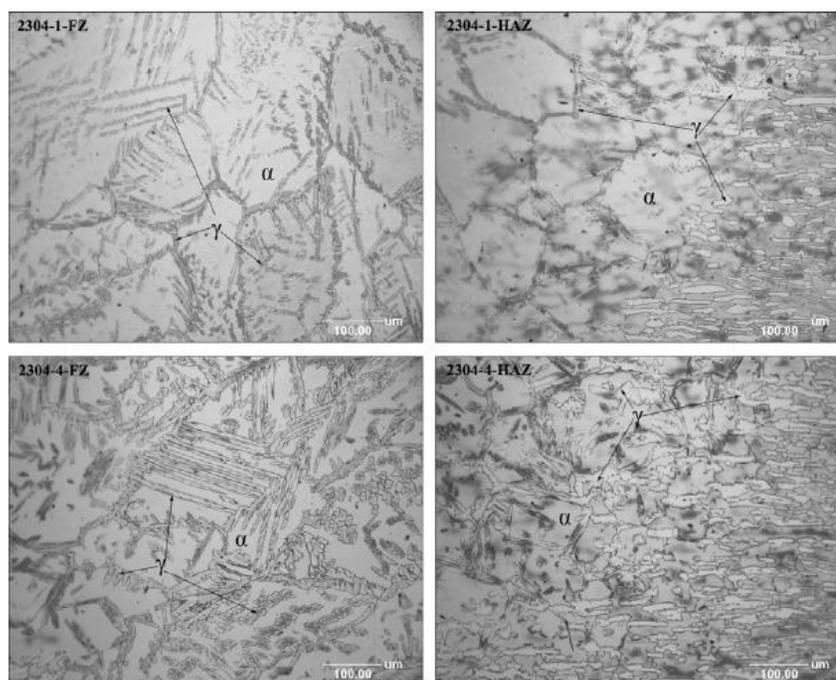


Figura 3.8 Microestructura de uniones en la zona de fusión (FZ) y zona afectada por el calor (HAZ) de acero inoxidable dúplex 2304 soldadas por PAW [35]

Varbai y Májinger (2019) [36] efectuaron un ataque químico en las microestructuras de soldaduras de acero LDX 2101 y LDX 2404 efectuando una variación de los tiempos y ciclos de ataque mediante la solución Beraha's (85 mL

H₂O + 15 mL HCl + 1 g K₂S₂O₅) para un proceso de caracterización de análisis de imagen que permitió determinar la relación de fase austenita-ferrita, obteniendo mejores imágenes y facilitando la cuantificación de fases en los aceros dúplex cuyo desarrollo microestructural permite indagar el efecto térmico del proceso de soldadura en la microestructura resultante. En la **Figura 3.9** se observan las micrografías obtenidas mediante diferentes tiempos de exposición al medio atacante.

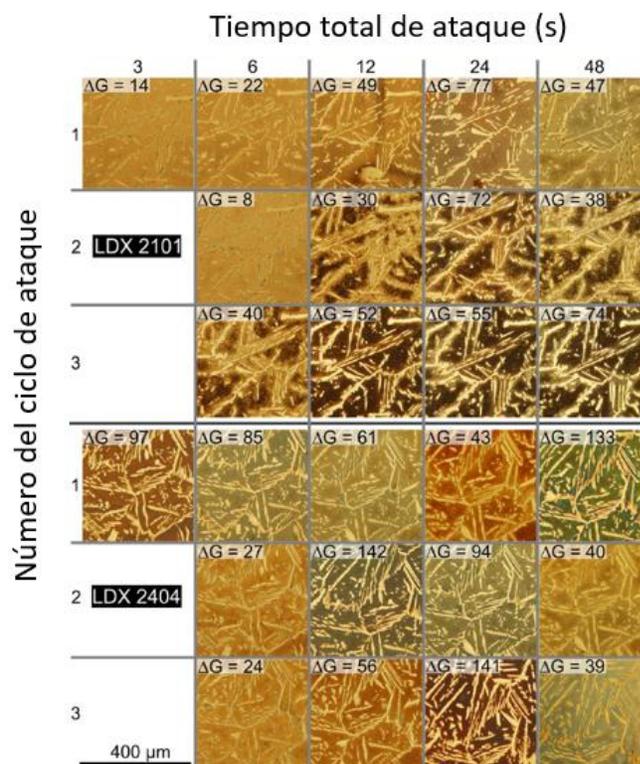


Figura 3.9 Microestructura de uniones soldadas de LDX 2101 y LDX 2404 atacados con Beraha's [36]

Posteriormente realizaron soldaduras mediante los procesos GTAW y PAW variando las entradas de calor en uniones autógenas con ambos tipos de acero y se validaron mediante microscopía óptica y microscopía óptica de barrido.

En la **Figura 3.10** se muestran las distintas imágenes obtenidas a partir de las muestras atacadas.

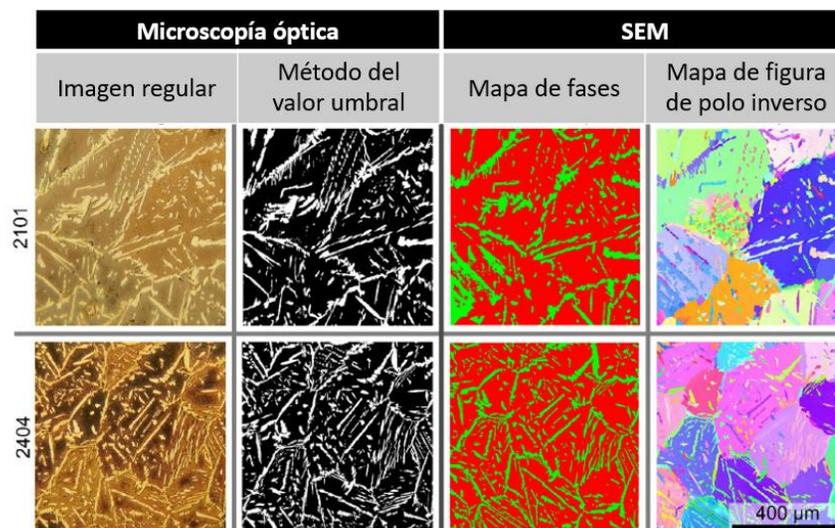


Figura 3.10 Comparación de imágenes tomadas por microscopio óptico y microscopía electrónica de barrido SEM con ataque optimizado del material muestra [36]

Eghlimi y colaboradores (2014) [37] emplearon metales de aportes de ER2594N SDSS en placas de acero HSLA con dimensiones de $6 \times 4.5 \times 1.4$ cm.

Para caracterizar el efecto del calor entrante empleando corriente pulsada, se compararon la composición de fases y microestructura de los revestimientos y su comportamiento a la corrosión. Las microestructuras obtenidas se observan en la **Figura 3.11**.

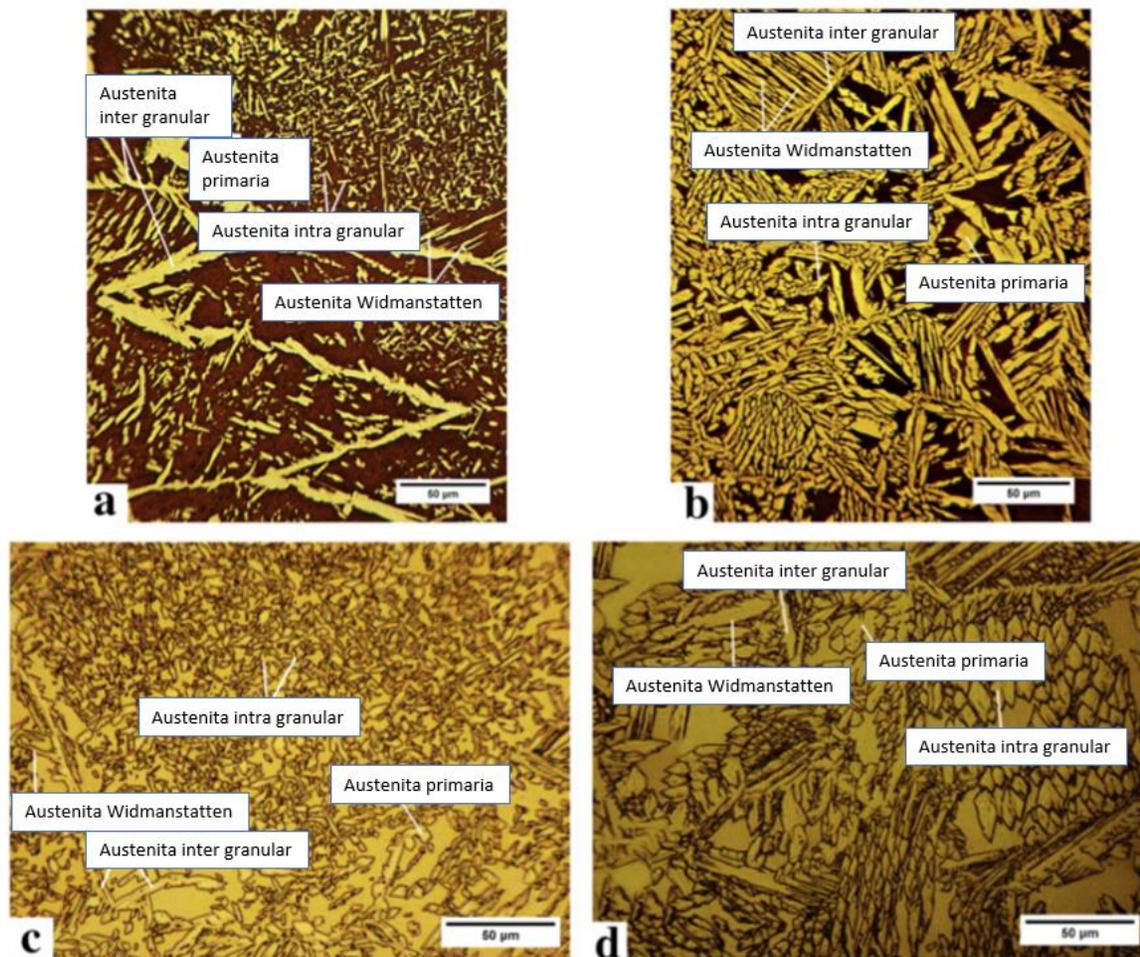


Figura 3.11 Microestructura representativa de la superficie superior de los revestimientos: a, c. corriente pulsada; b, d. corriente constante. a y b atacados reactivo de Beraha's, y c y d ataque electrolítico en solución de NaOH al 40%

[37]

Los resultados mostraron que la velocidad de enfriamiento más lenta de revestimiento con corriente directa condujo a un mayor contenido de austenita y mejor resistencia a la corrosión. También se encontró que la formación de austenita secundaria no influyó significativamente en el comportamiento a la corrosión y la película pasiva formada en el revestimiento obtenido con corriente pulsada presento más defectos. Una mayor velocidad de enfriamiento resultó en una estructura de grano más fina en el revestimiento hecho con corriente pulsada y causó una mayor formación de austenita intra granular.

CAPÍTULO 4 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE

Los DSS se encuentran entre aquellos aceros que son producidos y empleados específicamente para someterse a condiciones de operación altamente corrosivas, sin embargo, en soldadura la microestructura bifásica de dichos aceros requiere de un amplio conocimiento del comportamiento del material al ser sometidos a una fuente de calor para así conocer los parámetros de operación del proceso de soldadura empleado y mantener las propiedades del material base. Aunado a lo anterior, existen aplicaciones de soldadura que requiere el uso de materiales o placas de bajo espesor, por lo que un proceso de soldadura del que se tiene constancia de su uso en la unión de distintos tipos de DSS y su alta eficiencia en uniones de materiales de bajo espesor, es el proceso GTAW.

Investigaciones han reportado que al emplearse una baja entrada de calor en los DSS estos mantienen en mayor medida sus propiedades originales así como su resistencia a la corrosión [22]. Los parámetros de soldadura de los DSS se encuentran habitualmente entre los 80 A y 120 A conjunto a un flujo abundante de gas protector entre 10 y 15 L/min, en donde un mayor amperaje dentro del rango mencionado mantiene la dureza y propiedades del material base [23,24].

Se ha comprobado la existencia de ciertas similitudes en los comportamientos microestructurales de los DSS y los aceros inoxidables

austeníticos en donde una alta intensidad de corriente (110 A) y empleo de materiales de aporte con un alto contenido de cromo y níquel generan uniones con alta resistencia al impacto y retención de las fases ferrita y austenita, en cambio los aportes con alto contenido de níquel y mayor ausencia de cromo generan fases secundarias indeseadas y pérdida de la resistencia al impacto cercana al 80%. Por lo tanto, la adición de cromo como de níquel en DSS e inoxidables austeníticos resulta en una mejor retención de sus propiedades en la zona de soldadura [25,26].

La eficiencia del proceso GTAW tiene un valor estimado de 0.44 calculado a partir del calor que fluye a través del material con respecto al perdido en el medio de trabajo [27]. En la unión de placas de DSS con bajo espesor las entradas de calor aproximadas a los 1.2 kJ/mm permiten obtener penetración completa de la soldadura en el material y a su vez evitar fases perjudiciales en la soldadura [28]. Intensidades de corriente demasiado altas propician la generación de fases perjudiciales debidas a un mayor tiempo de enfriamiento del material causado por entradas de calor superiores a 1.2 kJ/mm [29].

La presencia de ferrita y austenita en cantidades similares se considera ligada a propiedades adecuadas para el área de aplicación de los DSS. Además se tiene constancia de que a mayores contenidos de ferrita el material será más frágil y un mayor contenido de austenita lo hará más dúctil [30].

Las uniones con mejores propiedades usualmente son aquellas con un tiempo de enfriamiento más rápido, pues se evita la generación de fases secundarias, mencionando además que la mezcla del gas protector en el proceso GTAW es de suma importancia en la microestructura final de las uniones soldadas, donde emplear 100% Ar genera fases como la austenita secundaria, sin embargo, aquellas con contenido de nitrógeno evitan la formación de dicha fase [31].

Entre los principales procesos para realizar uniones de bajo espesor se encuentra el GTAW y LBW en donde la principal diferencia se encuentra en la

microestructura a obtener en la zona de fusión donde el proceso GTAW mantiene en mayor medida la microestructura inicial [32]. Cuando se emplea el proceso LBW se generan uniones de bajo espesor con baja ZAC y buena estética superficial, no obstante, no es adecuado para mantener la microestructura de los DSS en las soldaduras [33].

El porcentaje de cromo también juega un papel clave en los procesos de soldadura debido a que la ausencia de variaciones en este porcentaje indica que no hay formación de compuestos intermetálicos formados a partir de este componente [34]. Por otro lado, también es importante considerar la alta solubilidad del nitrógeno en aceros con alto contenido de níquel, en donde mezclas de gas protector con N_2 pueden generar la aparición de nitruros y óxidos en la zona de soldadura [35].

Finalmente, el correcto empleo de parámetros de soldadura con una entrada de calor tal que la velocidad de enfriamiento evitará la aparición de fases no deseadas en la soldadura solo podrá verificarse mediante una exhaustiva caracterización metalográfica y análisis de fases presentes en las uniones [36,37].

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

El principal objetivo de la elaboración de la presente monografía fue el estudiar el efecto del calor de entrada en el desarrollo microestructural en uniones LDSS/SDSS mediante el proceso GTAW manual cuya recopilación bibliográfica y caso de estudio permitieron alcanzar las conclusiones listadas a continuación:

- 1) El proceso GTAW manual produce soldaduras carentes de defectos aparentes en placas de DSS de bajo espesor (2 mm a 3 mm).
- 2) Los rangos óptimos en la soldadura de aceros inoxidables dúplex mediante el proceso GTAW manual se encuentran entre los 80 A - 120 A, 12 V - 14 V y flujos de gas protector (Ar 99%) de 10L/min a 15L/min en placas de bajo espesor; destacando que los valores de intensidad de corriente y voltaje incrementaran al aumentar el espesor de las placas a soldar.
- 3) Los rangos de la intensidad de corriente en el proceso GTAW para la soldadura de aceros SDSS y LDSS serán seleccionados principalmente considerando el espesor del material y el gas de protección a emplear, en donde 99% Ar obtendrá uniones sin defectos visibles con intensidades de corriente promedio de 120 A y las mezclas de gases obtendrán estos mismos resultados con valores entre 80 A y 120 A.

- 4) La proporción ferrita – austenita de los materiales se ve afectada por la variación de los valores de intensidad de corriente debido a que estos determinan el flujo de calor sobre las uniones generando alteraciones en la microestructura de los materiales.
- 5) Para el proceso GTAW empleado en aceros DSS, una baja entrada de calor (por debajo de 1.2 kJ/mm) resultará en una mayor cantidad de ferrita en la zona de fusión, y al aumentar la entrada de calor incrementará el porcentaje de la fase austenita en la zona de fusión.
- 6) Los aceros DSS y los aceros inoxidable austeníticos presentan cualidades de soldabilidad semejantes en donde para ambos se emplean materiales de aporte con altos contenidos de níquel para la preservación de la fase austenita.
- 7) Entradas de calor superiores a 1.5 kJ/mm producen efectos negativos en la soldadura de DSS debido a que esto genera un tiempo de enfriamiento más lento, dando lugar a la formación de fases secundarias perjudiciales.
- 8) La adición de elementos aleantes de tipo gammágeno (principalmente Ni y N₂) permiten retener las propiedades del material base tras efectuar soldaduras mediante el proceso GTAW en aceros DSS esto debido a que se evita la formación de ferrita a partir de la austenita.
- 9) En la soldadura manual de placas de aceros inoxidable dúplex 2304 y 2507 de bajo espesor se recomienda una velocidad de avance aproximada de 5 mm/s para obtener resultados semejantes a los estudiados en la literatura. Incrementar la velocidad de avance requerirá un aumento de la entrada de calor, disminuir dicha velocidad conllevará disminuir la entrada de calor; lo anterior debido a que el tiempo de exposición a la fuente de calor para producir

soldaduras sanas dependerá del valor de entrada de calor sobre el material, dicho valor dependerá del amperaje y voltaje empleado.

- 10) La determinación de la proporción austenita – ferrita en uniones soldadas de DSS permite visualizar y estudiar el efecto del flujo de calor en la microestructura de los materiales base a soldar.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Askeland, "Stainless Steels," in *THE SCIENCE AND INGENIERING OF MATERIALS*, 7th ed., University of Missouri, 2017, p. 485.
- [2] R. Bhadeshia, H; Honeycombe, *STEELS MICROESTRUCTURE AND PROPERTIES*, 4th ed. Oxford, United Kingdom: Elsevier, 2017.
- [3] H. H. R. Bhadeshia, *STEELS MICROESTRUCTURE AND PROPERTIES*, 4th ed. Oxford, United Kingdom: Elsevier, 2017.
- [4] M. Vural, "Welding Processes and Technologies," in *Comprehensive Materials Processing Volume 6*, Istanbul, Turkey., 2014, pp. 3–48.
- [5] R. Paulraj, P.;Garg, "Effect of welding parameters on pitting behavior of GTAW of DSS and super DSS weldments," *Eng. Sci. Technol.*, vol. 19, pp. 1076–1083, 2016.
- [6] M. El, "Caracterización Termodinámica de Aceros Inoxidables Austeníticos AISI 304," Universitat Politècnica de Catalunya, 2003.
- [7] J. Lo, K; Shek, C; Lai, "Recent development in stainless steel," *Mater. Sci. Eng.*, vol. 65, no. 4–6, pp. 39–104, 2009.
- [8] J. Vazquez, "Estudio de la Precipitación de Carburos en el Acero Inoxidable AISI 304 en Enfriamiento Continuo," Maestría, FIME-UANL, 1996.
- [9] G. Nilson, J; Ghai, *The physical metallurgy of duplex stainless steel*. Porc., 2010.
- [10] D. Bernstein; Pecker, "Handbook of Stainless Steels," in *Handbook of Stainless Steels*, McGraw-Hill, Ed. 1977.
- [11] N. Wen, "Metallurgical Evaluation of Cast Duplex Stainless Steels and Their Weldments," University of Tennessee, 2001.
- [12] D. Aloke, P; Sergiy, "Alloy elements," in *Handbook of Solid State Difussion, Volume 2 - Difussion Analysis in Material Aplications*, 2017.
- [13] L. Karlsson, "Duplex and super duplex steel," in *Welding of stainless steel*, Suiza, 2000.
- [14] "ASM Handbook Volume 9," ASM Intern., ASM, 2004.
- [15] I. M. Association, Ed., *Directrices Prácticas para la Fabricación de los Aceros Inoxidables Dúplex*, 1st ed. Pittsburgh, PA, USA, 2012.
- [16] J. C. Lippold, "DUPLEX STAINLESS STEELS," in *WELDING METALLURGY AND WELDABILITY OF STAINLESS STEELS*, 2005, pp. 237–238.
- [17] J. Wiley, "Paper Industry," in *Ullman ´s Pollymers and Plastics - Products and Processes, 4 Volume Set*, p. 2016.
- [18] H. Olsson; Grtitzner, "Experiences with a high alloyed stainless steel under highly corrosive conditions," *Mater. Corros.*, vol. 40, no. 5, p. 279-284, 1990.
- [19] "Recommend practices for gas tungsten arc welding," in *AWS C5.5 & AMERICAN NATIONAL STANDARD*, EE.UU: AWS Welding Research,

- 2003, pp. 9–18.
- [20] A. Hashemi; Masoud; Halvae, “Effect og GTAW Parameters on Structure and Mechanical Properties of C86300 Weld Joint,” *Trans. Indian Inst. Met.*, vol. 67, pp. 741–752, 2014.
- [21] J. G. M. Akhlaghi, *Computational welding mechanics*, S.-V. Vol. Springer US, 2005.
- [22] A. Yousefieh, M.;Shamanian, M.; Saatchi, “Influence of Heat Input in Pulsed Current GTAW Process on Microstructure and Corrosion Resistance of Duplex Stainless Steel Welds,” *J. IRON STEEL Res. Int.*, vol. 78, pp. 65–69, 2011.
- [23] P. Prabhu and G. Rajnish, “Effect of welding parameters on pitting behavior of GTAW of DSS and super DSS weldments,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 19, no. 2, pp. 1076–1083, 2016.
- [24] P. Anbarasu, R. Yokeswaran, A. G. Antony, and S. Sivachandran, “Proceedings Investigation of filler material influence on hardness of TIG welded joints,” *Mater. TODAY Proc.*, pp. 3–6, 2019.
- [25] K. D. Ramkumar, P. N. Pravin, S. Bhargav, D. Arun, and C. S. Vadakken, “Microstructure and mechanical integrity relationship of PDC weld joints involving dissimilar marine grade alloys,” *J. Manuf. Process.*, vol. 50, no. December 2019, pp. 111–122, 2020.
- [26] B. Singh, P. Singhal, and K. Kumar, “Investigation of Thermal Efficiency and Depth of Penetration during GTAW Process,” *Mater. Today Proc.*, vol. 18, pp. 2962–2969, 2019.
- [27] K. D. Ramkumar *et al.*, “Effect of optimal weld parameters in the microstructure and mechanical properties of autogeneous gas tungsten arc weldments of super-duplex stainless steel UNS S32750,” *J. Mater.*, 2014.
- [28] A. Sadeghian, M.; Shamanian, M.; Shafyei, “Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of dissimilar joints between super duplex stainless steel and high strength low alloy steel,” *Mater. Des.*, vol. 60, pp. 678–684, 2014.
- [29] S. Li, Y. Wang, and X. Wang, “Annealing induced recovery of long-term thermal aging embrittlement in a duplex stainless steel,” *Mater. Sci. Eng.*, 2014.
- [30] S. Wang, P. Chiu, J. Yang, and J. Fang, “Gamma (γ) phase transformation in pulsed GTAW weld metal of duplex stainless steel,” vol. 420, pp. 26–33, 2006.
- [31] S. Pamuk and K. Sojiphan, “Effects of argon-nitrogen backing gas ratios on microstructure and corrosion resistance of duplex stainless steel pipe ASTM A790 welds by gas tungsten arc welding process,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 3, pp. 9512–9518, 2018.
- [32] A. I. Mourad, A. Khourshid, and T. Sharef, “Gas tungsten arc and laser beam welding processes effects on duplex stainless steel 2205 properties,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 549, pp. 105–113, 2012.
- [33] S. Geng, J. Sun, L. Guo, and H. Wang, “Evolution of microstructure and corrosion behavior in 2205 duplex stainless steel GTA-welding joint,” *J. Manuf. Process.*, vol. 19, pp. 32–37, 2015.

- [34] E. M. Westin, C. A. Olsson, and S. Hertzman, "Weld oxide formation on lean duplex stainless steel," *Corros. Sci.*, vol. 50, pp. 2620–2634, 2008.
- [35] Y. Jiang, H. Tan, Z. Wang, J. Hong, L. Jiang, and J. Li, "Influence of Cr eq / Ni eq on pitting corrosion resistance and mechanical properties of UNS S32304 duplex stainless steel welded joints," *Corros. Sci.*, vol. 70, pp. 252–259, 2013.
- [36] B. Varbai and K. Májlínger, "Optimal etching sequence for austenite to ferrite ratio evaluation of two lean duplex stainless steel weldments," *Measurement*, vol. 147, pp. 1–5, 2019.
- [37] A. Eghlimi, M. Shamanian, and K. Raeissi, "Surface & Coatings Technology Effect of current type on microstructure and corrosion resistance of super duplex stainless steel claddings produced by the gas tungsten arc welding process," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 244, pp. 45–51, 2014.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama de fases ternario para un DSS Fe-Cr-Ni con 68% de Fe [15].....	12
Figura 2.2 Diagrama de precipitación isotérmico para DSS 2205, 2304 y 2507 [16].....	15
Figura 2.3 Efecto del trabajo en frío de en las propiedades mecánicas del DSS 2205 [17].....	16
Figura 2.4 Diagrama general del proceso GTAW [21]	18
Figura 3.1 Micrografías de la soldadura[22].....	26
Figura 3.2 Microestructuras de interfaz en soldaduras TIG por corriente pulsada de UNS S32750 y HSLA empleando aporte ER80SNi-3 [25]	29
Figura 3.3 Microestructuras de interfaz en soldaduras TIG por corriente pulsada de UNS S32750 y HSLA empleando aporte ER2553 [25]	29
Figura 3.4 Microestructura de la zona de soldadura del UNS 32750 a 200X [27]	31
Figura 3.5 Micrografías ópticas de (a) formación de austenita secundaria en la raíz de soldadura de la muestra soldada con gas de respaldo 100% Ar; (b) formación de austenita secundaria en la raíz de soldadura de la muestra soldada con gas de respaldo 100% N ₂ [31].	34
Figura 3.6 Micrografías ópticas de sección transversal de unión soldada mediante GTAW. (a) Juntas diferentes regiones (Metal base, ZAC y Soldadura) (b) y (c) Mayores aumentos para la región ZAC [32]	36
Figura 3.7 Micrografías ópticas de sección transversal de unión soldada mediante LBW. (a) y (b) Las imágenes muestran las diferentes regiones (Metal base, ZAC y Soldadura). (c) Imagen de mayor aumento para la región de la ZAC [32].....	36
Figura 3.8 Microestructura de uniones en la zona de fusión (FZ) y zona afectada por el calor (HAZ) de acero inoxidable dúplex 2304 soldadas por PAW [35].....	39
Figura 3.9 Microestructura de uniones soldadas de LDX 2101 y LDX 2404 atacados con Beraha's [36].....	40
Figura 3.10 Comparación de imágenes tomadas por microscopio óptico y microscopía electrónica de barrido SEM con ataque optimizado del material muestra [36].....	41
Figura 3.11 Microestructura representativa de la superficie superior de los revestimientos: a, c. corriente pulsada; b, d. corriente constante. a y b atacados reactivo de Beraha's, y c y d ataque electrolítico en solución de NaOH al 40% [37].....	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Características de los aceros inoxidables [6].....	10
Tabla 2.2 Efectos de los elementos aleantes en aceros [11]	12
Tabla 3.1 Parámetros de soldadura [23]	27
Tabla 3.2 Parámetros empleados en la soldadura de SDSS y HSLA [25]	28
Tabla 3.3 Parámetros de soldadura [31]	33