

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**SOLDABILIDAD DEL ACERO INOXIDABLE DÚPLEX 2205 MEDIANTE EL
PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN FSW**

POR

BRYAN RAMIRO RODRÍGUEZ VARGAS

MONOGRAFÍA

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

SALTILLO COAHUILA, A 18 DE MARZO DE 2016

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**SOLDABILIDAD DEL ACERO INOXIDABLE DÚPLEX 2205 MEDIANTE EL
PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN FSW**

POR

BRYAN RAMIRO RODRÍGUEZ VARGAS

MONOGRAFÍA

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

SALTILLO COAHUILA, A 18 DE MARZO DE 2016

AGRADECIMIENTOS

Mediante el presente apartado deseo agradecer a todas aquellas personas que con su ayuda, apoyo y demás idóneas actitudes han hecho esto posible.

Agradezco infinita y totalmente a Dios que sin su venia esto no pudo haberse realizado, siempre mi completa gratitud ante él. Doy las gracias a la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la oportunidad, facilidades, manutención mediante las cuales fue posible realizar el proyecto de investigación. Enfatizo mi gratitud hacia la Dra. Argelia Fabiola Miranda Pérez, por su dirección, asesoramiento y liderazgo para construir y culminar este trabajo. De igual manera agradezco a mis revisores, la Dra. Gladys Yerania Pérez Medina y Dr. Felipe de Jesús García Vázquez, además a cada uno de los Doctores, Maestros, Ingenieros, revisores de seminario y aquellos que sin responsabilidad alguna proporcionaron su conocimiento para el progreso de esta investigación. Me permito dar las gracias a la Università degli Studi di Padova,

y extender un reconocimiento a la eminente Prof.ssa Irene Calliari por cada una de sus atenciones, conocimiento, tiempo y espacio para el desarrollo y aprendizaje de este trabajo monográfico.

Y finalmente, sin restarles importancia agradezco a mis padres Ramiro y Raquel, mi familia, por siempre estar al pie del cañón en todo momento ¡Ustedes son y serán todas mis razones!

DEDICATORIA

A Dios

A mi familia y en especial a mis abuelos.

El señor me ha dado la oportunidad de tener a los mejores abuelos del mundo.

“Pienso en que la mejor manera de volar quizá sea con las manos llenas de tierra para no olvidar nunca de dónde venimos y cuán duro puede ser a veces andar”

Ally Condie

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	iii
ÍNDICE	iv
SÍNTESIS	1
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	2
1.1 Antecedentes	2
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos.....	4
1.3 Justificación.....	4
1.4 Planteamiento del problema.....	5
1.5 Aportación tecnológica	6
1.6 Alcances y delimitaciones	6
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	7
2.1 Generalidades del acero inoxidable	7
2.1.1 Definición.....	7
2.1.2 Funcionamiento de la capa pasiva en los aceros inoxidables	8
2.1.3 Pasivado.....	9
2.1.4 Influencia de los elementos aleantes en los aceros inoxidables	10
2.1.5 Diagramas de fases para los aceros inoxidables	13
2.1.5.1 Diagrama Fe-Cr	14
2.1.5.2 Diagrama de Fe-Cr-Ni.....	15

2.2	Clasificación de los aceros inoxidables	18
2.2.1	Aceros inoxidables dúplex.....	19
2.2.1.1	Generalidades.....	19
2.2.1.2	Definición	19
2.2.1.3	Clasificación de los aceros inoxidables dúplex	20
2.2.1.4	Metalurgia de los aceros inoxidables dúplex.....	22
2.2.1.5	Transformaciones de fase en los aceros inoxidables dúplex 23	
2.2.1.6	Propiedades mecánicas.....	26
2.2.1.7	Aplicaciones de los aceros inoxidables dúplex	26
2.2.1.8	Características generales del acero inoxidable dúplex 2205 27	
2.3	Proceso de Soldadura por Fricción Agitación (FSW)	29
2.3.1	Soldadura en estado sólido	29
2.3.2	Antecedentes	29
2.3.3	Generalidades	29
2.3.4	Principios de Operación	30
2.3.5	Parámetros del proceso	32
2.3.6	Fundamentos Metalúrgicos del Proceso FSW	34
2.3.6.1	Introducción	34
2.3.6.2	Recuperación.....	35
2.3.6.3	Recristalización.....	37
2.3.6.4	Crecimiento de grano.....	39
2.3.7	Aspectos generales del desarrollo microestructural en materiales soldados por FSW.....	39
2.3.8	Ventajas y limitaciones del proceso.....	43

2.3.9	Calidad de la soldadura producida por FSW	45
2.3.9.1	Discontinuidades de procedimiento	45
2.3.9.2	Discontinuidades metalúrgicas	47
2.3.10	Aplicaciones del proceso FSW	48
2.3.11	FSW aplicado en aceros inoxidables dúplex 2205	48
2.3.11.1	Efecto de la velocidad de avance y rotación en las uniones del acero inoxidable dúplex 2205 por FSW	48
2.3.11.2	Formación de segundas fases y precipitados en las uniones de DSS 2205 mediante el proceso FSW	53
2.3.11.3	Influencia en las propiedades mecánicas	54
2.3.11.4	Formación de la estructura de grano en aceros inoxidables dúplex sometidos al proceso de soldadura por fricción agitación.....	55
CAPÍTULO 3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE BIBLIOGRAFÍA.....		58
CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES		61
ÍNDICE DE FIGURAS.....		63
ÍNDICE DE TABLAS		65
BIBLIOGRAFÍA.....		66
RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO		72

SÍNTESIS

En el presente trabajo monográfico se hace una recopilación del estado del arte sobre los cambios microestructurales e impacto de las variables del proceso de fricción agitación al unir el acero inoxidable dúplex 2205. Dentro del análisis bibliográfico fue posible encontrar las causas de ausencia de segundas fases y compuestos intermetálicos (perjudiciales en las características mecánicas y químicas idóneas de los aceros inoxidables dúplex) las cuales se presentan en el material al estar inmerso en procesos térmicos como la soldadura. Además, se reportan estudios realizados por diversos investigadores, los cuales convergen en que la microestructura que se obtiene en las uniones soldadas por FSW es resultado de un proceso de recristalización dinámica continua, a causa de los diversos parámetros del proceso, los cuales a su vez impactan en las propiedades mecánicas del acero inoxidable dúplex.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En la actualidad, la industria automotriz demanda materiales que provean a sus productos de óptimas propiedades, como la necesidad de poseer una elevada resistencia mecánica (con el objetivo de brindar seguridad al pasajero en el funcionamiento del automóvil), que sean ligeros y tengan una estabilidad aerodinámica, además de mantener una sustancial resistencia a medios corrosivos y/o dañinos que puedan afectar las diversas autopartes del producto cuando éste es sometido a medios hostiles o incluso por efectos del propio funcionamiento del automóvil.

La industria automotriz, con base en las características anteriores, ha generado interés en el empleo de aceros inoxidables dúplex (DSS, por sus siglas en inglés) debido a que poseen una buena resistencia a la abrasión, erosión y deformación por fatiga, así como una alta absorción de energía y baja expansión térmica. La alta resistencia mecánica de los DSS es resultado de su microestructura bifásica y la aleación con nitrógeno. Esta alta resistencia da la oportunidad de reducir el peso con la consecuente disminución del costo a la industria automotriz, debido a la utilización de material cuyo espesor sea más delgado.

Estos materiales han sido seleccionados para su uso en la fabricación de componentes expuestos a escenarios excepcionales de desempeño (ambientes altamente corrosivos y expuestos a grandes presiones y temperaturas), es por ello que las condiciones de su fabricación deben reunir características que mantengan las sobresalientes propiedades que poseen estos materiales en cuanto a resistencia mecánica y resistencia a la corrosión.

La manufactura de los aceros inoxidables dúplex involucra el uso de procesos de soldadura por fusión que promueven la presencia de cambios microestructurales debido a los elevados intercambios de calor y/o conducción térmica, o afecciones como porosidad provocada por difusión del gas protector en la unión, faltas de fusión y fisuras en caliente, entre otras.

Una de las innovaciones en el empleo de estos materiales para la manufactura de autopartes es el uso de procedimientos de soldadura en estado sólido, como el proceso de soldadura por fricción agitación (FSW, por sus siglas en inglés), cuyos resultados podrían explicarse partiendo de las funciones objetivo del instrumental empleado en este proceso de soldadura, ya que la temperatura de la pieza con la que se encuentra trabajando se eleva hasta hacer plástica la unión, sin fundir el material, posteriormente el hombro de la herramienta mantendrá constante la temperatura, del mismo modo el material en condición plástica se irá moviendo produciendo la coalescencia.

El resultado del proceso producirá una unión en estado sólido (sin fusión), llevándose a cabo solamente una deformación plástica, sin embargo, la microestructura del DSS y sus diversas propiedades mecánicas pueden presentar cambios debido a la gran fuerza motriz que produjo el alto grado de deformación plástica.

Las investigaciones desarrolladas previamente sobre los parámetros del proceso FSW consistentes en la velocidad de desplazamiento de la herramienta con respecto al material base, la velocidad de rotación y la presión que se aplique han denotado que son factores importantes para determinar las propiedades mecánicas de la unión y el desempeño que el material tenga en su aplicación final.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar un estudio bibliográfico sobre los cambios microestructurales y la posible formación de precipitados en el acero inoxidable dúplex 2205 bajo el efecto de los parámetros del proceso de soldadura por fricción agitación (FSW).

1.2.2 Objetivos específicos

- Recopilar información relevante del estado del arte de la aplicación del proceso FSW en aceros inoxidables dúplex.
- Identificar, analizar y estudiar las características, recopiladas de la bibliografía, que presentan las microestructuras producidas en las uniones sobre el material al aplicar el proceso FSW
- Estudiar el efecto que tienen los parámetros del proceso FSW sobre las propiedades mecánicas de dureza y tenacidad en las uniones del DSS.
- Inquirir sobre la formación de fases intermetálicas en las uniones soldadas.
- Estudiar el impacto que tienen las variables del proceso FSW y la viabilidad del procedimiento al ser aplicado en aceros inoxidables dúplex con uso en la industria automotriz.

1.3 Justificación

La industria automotriz emplea aceros inoxidables, buscando reducir las afecciones que se presentan en los materiales que actualmente se utilizan cuando se someten a proceso de manufactura como la soldadura, tal es el caso de los aceros inoxidables dúplex: materiales utilizados en la manufactura de automóviles con el fin de obtener productos con mayor calidad.

El estudio y análisis de las microestructuras y fases intermetálicas que se forman en las uniones realizadas por el proceso de soldadura por fricción agitación en los DSS es importante debido a que aportará conocimientos que permitan predecir los comportamientos y/o fallas en el material sometido al proceso mencionado, además podrá redituar en la aplicación de condiciones favorables del procedimiento sin la necesidad de recurrir la técnica “prueba y error”, dando cómo resultando la producción (económicamente viable) de piezas con mayor calidad.

1.4 Planteamiento del problema

La industria automotriz actualmente presenta un elevado interés por innovar en la aplicación de nuevos materiales que satisfagan las necesidades de la competencia comercial. La industria inmersa en tal motivación, se ha estado involucrando la implementación de aceros inoxidable dúplex para la fabricación de autopartes, con el fin de emplear sus diversas propiedades y evitar daños producidos por la corrosión proveniente del medio ambiente y/o emanaciones de residuos que el automóvil produce en su funcionamiento.

El trabajar con DSS demanda procesos de soldadura que reduzcan considerablemente los defectos producidos por un procedimiento de fusión, debido a que éstos generan diversas afecciones que reducen la resistencia mecánica y corrosiva por la posible formación de intermetálicos. Se ha promovido el empleo del proceso FSW, una reciente tecnología de soldadura, la cual reduce las afecciones mencionadas por ser un procedimiento en estado sólido.

Por tal motivo, es necesario inquirir y recopilar la información pertinente con respecto a la microestructura producida en las uniones para la aplicación de este proceso en la unión de aceros inoxidable dúplex 2205 con uso en la industria automotriz.

1.5 Aportación tecnológica

Este documento aportará información a la industria automotriz que en sus procesos de fabricación de estructuras para automóviles emplee como material base el acero inoxidable dúplex, debido a que se analizarán y estudiarán las diversas variables que presentan las uniones realizadas por el proceso FSW sobre el material en estudio, produciendo características esenciales para el posterior estudio de diversas propiedades mecánicas.

Además, se realizará la integración de un documento de consulta que describa las condiciones bajo las cuales se presentan y se evitan la formación de segundas fases en el DSS 2205, cuando éstos han sido unidos mediante un proceso de soldadura por fusión.

1.6 Alcances y delimitaciones

El alcance de este documento es recopilar y analizar la información sobre el estado del arte en la aplicación del proceso de soldadura por fricción agitación en aceros inoxidables dúplex 2205, para su posterior investigación de viabilidad en la industria automotriz.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1 Generalidades del acero inoxidable

Los aceros inoxidables constituyen una clasificación de aceros que han sido empleados constantemente en aplicaciones de ingeniería para un extenso campo dentro de la industria y ambientes cotidianos.

2.1.1 Definición

Son un grupo de aleaciones base en hierro (mayor constituyente en peso), con contenido máximo de 1.2% de carbono y un mínimo de 10.5% de cromo; resultado de esta combinación de elementos, son materiales con elevada resistencia a la corrosión y oxidación en medios específicos.

Algunos contienen en su composición porcentajes de níquel como segundo elemento aleante, así mismo, se encuentran adicionados otros elementos en menor proporción para satisfacer los requerimientos del fabricante. Las propiedades mecánicas y químicas del acero inoxidable dependen de los elementos aleantes y la estructura cristalina del acero (1)

La razón por la que el acero es llamado inoxidable se debe a que el cromo, elemento indispensable en la constitución de éste tipo de aceros, suele unirse con el oxígeno de manera inmediata formando una delgada película de óxido de cromo sobre la superficie del acero, impidiendo la corrosión u oxidación del material por efectos del medio donde se encuentre inmerso. (2)

Otras características relevantes de estos materiales pueden incluir la excelente formabilidad, su resistencia al agrietamiento a altas temperaturas y a temperaturas criogénicas y resistencia a la oxidación. (3)

2.1.2 Funcionamiento de la capa pasiva en los aceros inoxidables

La resistencia a la corrosión se debe a que sobre el acero se forma una delgada e invisible película de óxido de cromo (Cr_2O_3), la cual permanece adherida fuertemente al metal, posee una elevada densidad, es químicamente resistente a agentes oxidantes (oxígeno, iones de hidrógeno, etc.) y al ataque de iones agresivos (ejemplo, los de cloruro), promoviendo la protección del acero. (1)

La capa pasiva que se forma en la superficie de los aceros inoxidables es rica en óxido de cromo y se produce de manera espontánea; este estado presente en las superficies de acero inoxidable es conocido como estado pasivo o condición pasiva (**Figura 2.1**).

La autopasivación ocurre de manera espontánea cuando la superficie limpia del material se expone a atmósferas ricas en oxígeno, de esta forma se propiciará la formación de la capa superficial de óxido abundante en cromo. Esta capa pasiva aumenta de grosor conforme transcurre el tiempo. Diversas condiciones naturales, como el contacto con el aire o agua, crearán o mantendrán la condición pasiva del acero inoxidable frente a la corrosión. Incluso si la superficie del acero fuese dañada o rayada de algún modo, la capa pasiva de sólo unos átomos de espesor, se recompondrán de manera instantánea por acción del oxígeno del aire o del agua.

Los aceros inoxidables no pueden considerarse resistentes a la corrosión en todos los ambientes de trabajo; dependiendo del tipo de composición del acero

existirán ciertas condiciones de trabajo donde se pierda el estado pasivo y no pueda recomponerse, en este caso, la superficie se convierte en estado activo promoviendo la corrosión del acero. Algunas ocasiones pueden darse condiciones activas en pequeñas zonas de los aceros inoxidables (ejemplo, uniones mecánicas, esquinas compactas, soldaduras mal acabadas, etc.) (4)

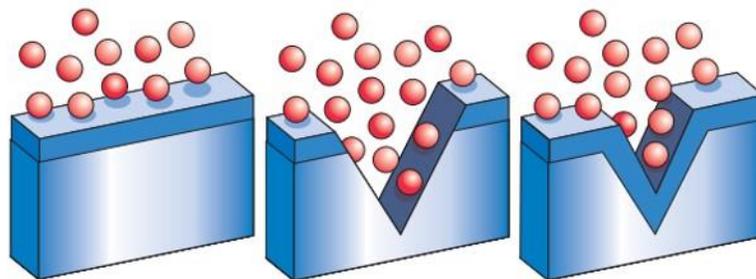


Figura 2.1 Funcionamiento de la capa pasiva en los Aceros Inoxidables (5)

2.1.3 Pasivado

El proceso de pasivado ocurre cuando se forma una película inerte sobre la superficie de un material metálico (ej. aceros inoxidables) cuya función será enmascarar al acero del efecto de agentes externos que intenten vulnerar su resistencia a la corrosión u oxidación.

El pasivado se suele producir de modo espontáneo sobre la superficie del acero inoxidable, sin embargo, en ocasiones es necesario emplear tratamientos con ácidos oxidantes para que el proceso se lleve a cabo.

Caso contrario al decapado y descascarillado, el pasivado no elimina metal alguno de la superficie, en consecuencia la calidad y espesor de la capa pasiva crece rápidamente.

Los aceros inoxidables emplean principalmente dos tipos de pasivado de acuerdo con la cantidad de ácido empleado en la concentración química: pasivado nítrico y pasivado cítrico. Pueden darse circunstancias en que los procesos de

decapado y pasivado se produzcan sucesivamente (en lugar de simultáneamente), durante tratamientos que empleen ácido nítrico, si bien el ácido nítrico por sí mismo sólo podrá pasivar las superficies de acero inoxidable. No es un ácido efectivo para decapar aceros inoxidables (6)

2.1.4 Influencia de los elementos aleantes en los aceros inoxidables

Las diversas propiedades mecánicas de los aceros inoxidables como la resistencia mecánica y a la corrosión, se encuentran influenciadas por la adición de diversos elementos aleantes al material. (1)

Los principales elementos de aleación para los aceros inoxidables son el cromo y carbono para los grados ferrítico y martensíticos, a su vez la adición de níquel para los grados austeníticos y dúplex. Otros elementos aleantes que participan en la composición de éstos materiales son manganeso, silicio, molibdeno, niobio, titanio, aluminio, cobre, tungsteno, nitrógeno, entre otros. Todos los elementos anteriores tienen un efecto en la soldabilidad y manufactura de los aceros inoxidables. (4)

El impacto que producen los elementos aleantes más comunes y su influencia en la estructura de los aceros inoxidables, se describen en la **Tabla 1**:

Tabla 1 Efecto de los elementos aleantes en la microestructura y propiedades de los aceros inoxidables (1; 4; 7; 8; 9; 10; 11; 12).

Cromo (Cr)	Elemento aleante de mayor importancia en los aceros inoxidables, proporcionándole la resistencia a la corrosión característica. Todos los aceros inoxidables contienen un mínimo de 10.5% e.p. de este elemento; la resistencia a la corrosión y las propiedades mecánicas del acero (debido a que es un elemento sustitucional) incrementan proporcionalmente al elevar su contenido. Esencial en la formación de compuestos intermetálicos y en elevadas proporciones puede promover una baja tenacidad y ductilidad.
Níquel (Ni)	Elemento aleante cuyo propósito es favorecer la formación y estabilización a temperatura ambiente de la fase austenita e incrementa la resistencia a la corrosión, particularmente en ambiente de ácido sulfúrico; aumenta la ductilidad y la tenacidad del acero inoxidable.
Manganeso (Mn)	Se emplea para estabilizar la estructura austenítica de los aceros con este grado. Aquellos aceros inoxidables que contengan en su composición porcentajes del 16 al 20% de Cr tienden a retener hasta un 0.22% de nitrógeno cuando éstos se solidifican, promoviendo la precipitación de nitruros de cromo. Para evitar lo anterior, se agrega Mn en porcentajes menores al 1%, lo cual favorecerá la solubilidad del nitrógeno en la fase austenita. Además, es empleado en los aceros inoxidables para mejorar su ductilidad en caliente; el efecto del manganeso sobre la relación austenita/ferrita varía con la temperatura: el Mn a baja temperatura estabilizará la fase austenita, mientras que a alta temperatura estiliza la fase ferrita.

 Elementos para el endurecimiento por precipitación

Silicio (Si) Agregado primordialmente para desoxidar al material durante el proceso de fusión cuando se somete al material a la soldadura. También amplía el rango de composición sobre la cual se forma la fase fragilizadora sigma.

Molibdeno (Mo) La adición de molibdeno a los aceros inoxidable influye en diferentes características dependiendo del grado del acero; para los aceros austeníticos, ferríticos y dúplex se agrega en cantidades de hasta 6%, promoviendo un aumento en la resistencia a la corrosión, y la mejora de la resistencia a elevadas temperaturas, sin embargo, esto puede resultar en forma negativa cuando el acero se necesita trabajar en caliente.

 Elementos Intersticiales

Carbono (C) Estabilizador de la austenita incrementando la resistencia mecánica de los aceros, sin embargo, es deseable controlar los porcentajes de C por debajo del 1.2% e.p., ya que en cantidades mayores propicia la formación de carburos de cromo, promotores de la corrosión intergranular.

En aceros inoxidable austeníticos el carbono se encuentra en composiciones más bajas (no sobrepasa el 0.08% e.p. de C) mientras que en los aceros martensíticos es imprescindible que sus contenidos sean altos para el endurecimiento de estos materiales

Nitrógeno (N) Se adiciona intencionalmente en algunos aceros grado austenítico (debido a que estabiliza la fase austenita) y dúplex. Este elemento es un efectivo agente formador de soluciones sólidas y en porcentajes mínimos como 0.15% e.p. puede aumentar considerablemente la resistencia del acero inoxidable

Un caso en particular son los aceros inoxidable dúplex, ya que se añade nitrógeno para elevar su fuerza, y resistencia a la corrosión por picaduras y hendiduras. Algunos contienen hasta un 0.3% e.p. de este elemento. La adición de manganeso para los aceros inoxidable austeníticos aumenta la solubilidad de nitrógeno. En los ferríticos y dúplex, se precipita $\text{Cr}_2\text{-N}$ si se ve superado su límite de solubilidad.

Los niveles de ambos elementos aleantes deben ser controlados si lo que se busca es un microestructura precisa. Una forma de controlar sus efectos es adicionando otros elementos para formar carburos y de esta forma reducir sus efectos negativos

2.1.5 Diagramas de fases para los aceros inoxidable

Las transformaciones de fase que se encuentran en estado estable en los aceros inoxidable pueden ser descritas mediante el empleo de diagramas de equilibrio, sin embargo, estos diagramas sólo sirven como un material de aproximación a la microestructura que se forma en el proceso de la soldadura, esto por dos razones:

1. Aproximadamente el material de aporte y los aceros inoxidable base contienen más de 10 elementos de aleación, que difícilmente pueden ser acomodados en un diagrama de fases convencional.
2. Las rápidas condiciones de enfriamiento y calentamiento que se presentan en los diversos procesos de soldadura no convergen con las condiciones presentes en los diagramas de equilibrio.

Existen diversos diagramas (en estado de equilibrio) que son empleados para aproximar las fases y microestructuras presentes en los aceros inoxidable, como lo son los diagramas Fe-Cr, Fe-Cr-C y Fe-Cr-Ni (8) (13).

2.1.5.1 Diagrama Fe-Cr

El diagrama Fe-Cr es el diagrama de fases primordial para describir las fases de equilibrio que se encuentren presentes en los aceros inoxidable, debido a que usa al Cr como elemento de partida (**Figura 2.2**)

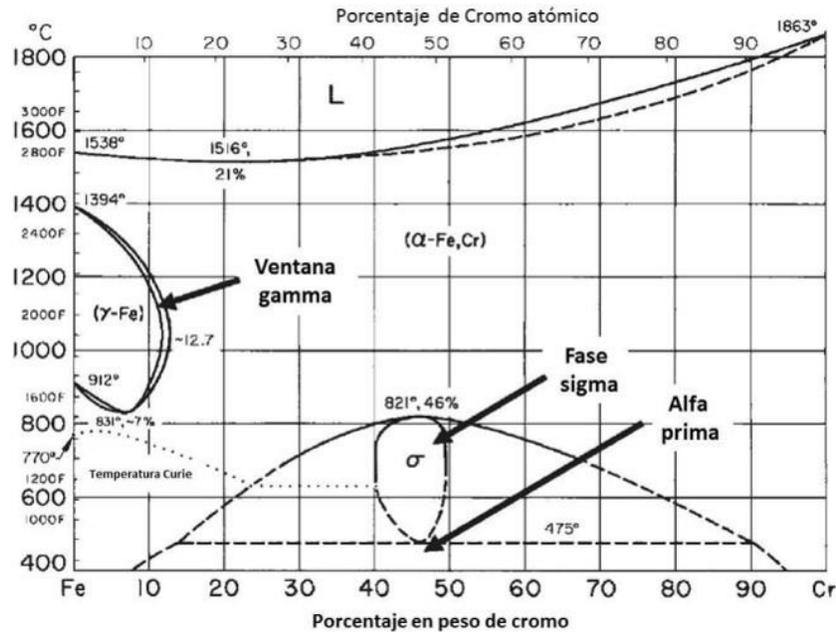


Figura 2.2 Diagrama de fases Fe-Cr (14)

Del diagrama de fases Fe-Cr se puede aseverar las siguientes características del acero inoxidable:

- La completa solubilidad del cromo (Cr) en el hierro (Fe) ocurre a elevadas temperaturas.
- La solidificación de todas las aleaciones Fe-Cr ocurren como fase ferrita.
- A bajas concentraciones de cromo aparece una ventana de austenita (Gamma Loop) en el rango de temperaturas de 912 a 1394 °C
- Aleaciones que contengan porcentajes superiores al 12.7% e.p. de cromo, serán ferrita cuando se encuentre a elevada temperatura, en cambio, con contenidos menores de cromo formarán austenita a temperaturas comprendidas en el rango de la ventana gamma.
- Cuando el enfriamiento de la aleación ocurre de manera rápida, la austenita puede transformar a martensita.

- La fragilización en frío es un fenómeno que ocurre a 475 °C, como resultado de la formación de precipitados ricos en cromo al interior de la matriz α .
- El diagrama también contiene una línea horizontal entre las fases $\alpha + \gamma$ a 475 °C. Un fenómeno conocido como fragilización en frío ocurre a 475 °C y resulta de la formación de precipitados coherentes rico en cromo al interior de la matriz α , llamados alfa prima. Se forman en los rangos de temperatura de 400 a 540 °C y han mostrado severos efectos en la fragilización de aleación es con contenidos mayores del 14 % e.p de cromo. La formación de alfa prima es lenta en aleaciones hierro - cromo pero se acelera con la adición de elementos aleantes (4) (8)

2.1.5.2 Diagrama de Fe-Cr-Ni

El níquel es un elemento que se adiciona a los sistemas Fe-Cr para estabilizar la fase austenítica a temperatura ambiente, produciendo la expansión de la ventana austenítica.

La adición de níquel a los sistemas hierro - cromo expande el campo de la austenita, permitiendo que esta fase pueda mantenerse estable a temperatura ambiente. Cabe destacar que este sistema ternario es la base para los aceros inoxidable austeníticos y dúplex. Las líneas sólidos y liquidus son empleadas para describir los fenómenos de solidificación basados en este tipo de sistemas, mismos que definen el inicio y fin de la solidificación (4) (14) .

La **Figura 2.3** expresa la fase de liquidus y sólidos en un sistema de aleación ternario Fe-Cr-Ni

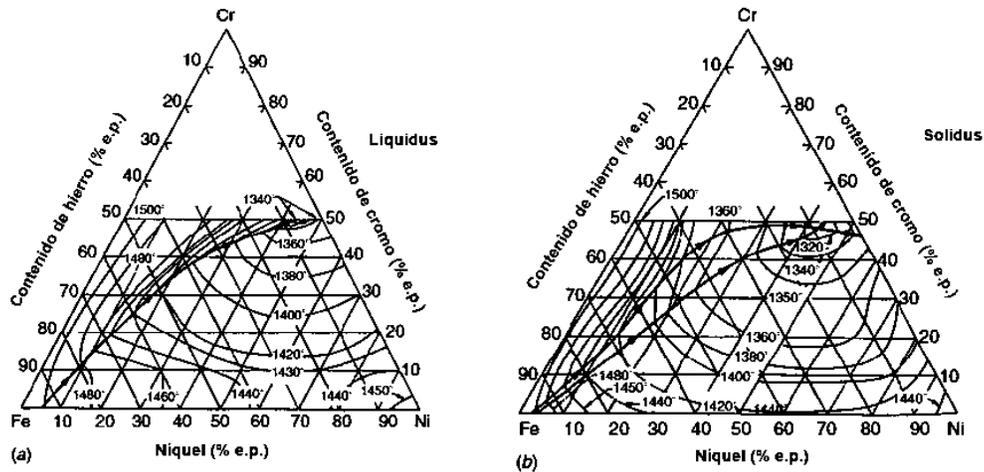


Figura 2.3 Proyecciones liquidus y sólidas de un sistema de aleación ternario Fe-Cr-Ni (14)

En los diagramas anteriores se toman como constantes la sección de hierro, generando un diagrama de fases pseudobinario, el cual es mostrado a continuación partiendo de composición 70% e.p. y 60% e.p.

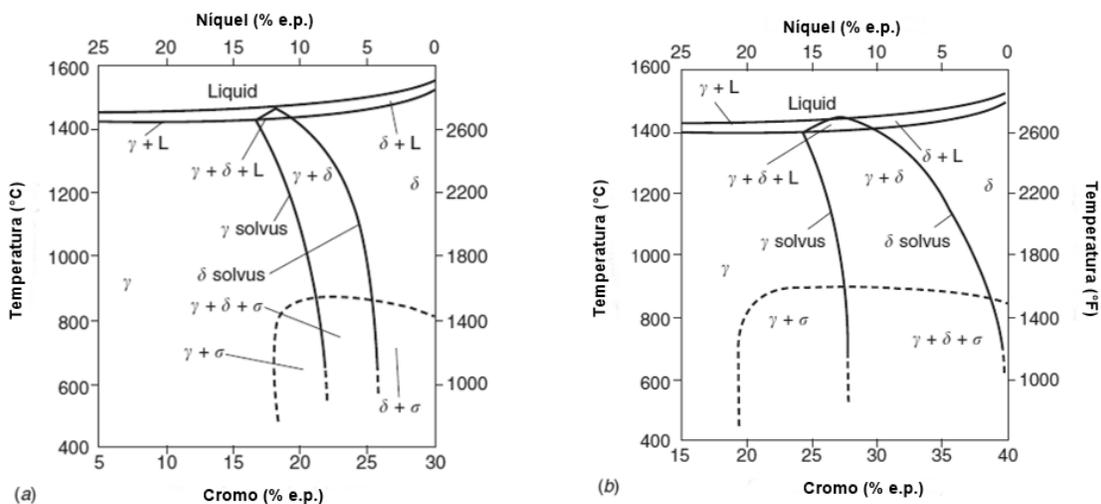


Figura 2.4 Secciones de un diagrama de fases de un sistema de aleación Fe-Cr-Ni ternario (15)

De la Figura 2.4 se pueden expresar las siguientes aseveraciones:

- Se nota una región triangular entre las líneas sólidos y liquidus, donde se sitúan las tres fases austenita-ferrita-líquido que separa a la región que solidifica como austenita (izquierda) y aquella que solidifica como ferrita (derecha).
- En estado sólido la ferrita es estable a elevadas temperaturas con contenidos de cromo mayores del 20% e.p.
- Como la temperatura decrece, esta ferrita transformaría parcialmente a austenita en el rango de 20 a 25% e.p.
- Las aleaciones que solidifican como austenita permanecen como tal después de enfriar a temperatura ambiente.
- Las aleaciones que solidifican como ferrita deberán enfriarse a través de la región bifásica $\alpha + \gamma$, dando como resultado la transformación de una porción de ferrita en austenita.
- A composiciones más a la derecha del triángulo (a una relación de cromo/níquel mayor) la ferrita se volverá cada vez más estable, hasta que su estructura sea completamente ferrítica en el extremo derecho de cada diagrama (4).

2.2 Clasificación de los aceros inoxidables

Los aceros inoxidables, a diferencia de otros materiales donde la clasificación es usualmente por su composición, éstos se clasifican por la fase metalúrgica que sea predominante. Las tres fases posibles en aceros inoxidables son ferrita, martensita y austenita (4).



Figura 2.5 Clasificación de los Aceros Inoxidables (4)

Las tres primeras clasificaciones de la **Figura 2.5** son referidas a la fase estable a la que se encuentra cada categoría; la cuarta clasificación, denominados aceros de endurecimiento por precipitación o aceros inoxidables “HP”, es referido a un tratamiento de envejecimiento que se les aplica a estos materiales para contrapuntar al temple y revenido llamado endurecimiento por transformación.

La clasificación dúplex son aquellos aceros que en su composición muestran un 50% de ferrita y 50% de austenita a temperatura del medio ambiente, cabe destacar que dichos aceros son altamente resistentes al fenómeno de corrosión (16).

Para que un acero sea austenítico, ferrítico o martensítico dependerá del equilibrio entre las cantidades de elementos aleantes que sirvan como estabilizadores entre cada fase del material y el ciclo de calentamiento-enfriamiento a la cual sea sujeto el acero (2).

2.2.1 Aceros inoxidables dúplex

2.2.1.1 Generalidades

Los aceros inoxidables dúplex (DSS, por sus siglas en inglés) son una familia de aceros inoxidables que combina una buena resistencia a la corrosión con alta resistencia mecánica y facilidad al manufacturarse. Sus propiedades físicas se sitúan entre las de los aceros inoxidables austeníticos y ferríticos. La resistencia de los aceros inoxidables dúplex a la corrosión por picaduras y a la corrosión por intersticios causadas por cloruros, es función del contenido de elementos aleantes como cromo, molibdeno, wolframio y nitrógeno (17).

2.2.1.2 Definición

Los aceros inoxidables dúplex son aleaciones cromo-níquel-molibdeno que contienen 21-30 % de cromo y 2-7% de Ni con una equilibrada proporción de estabilizadores que promueven la aparición de las fases primarias austenita con estructura cúbica centrada en las caras (FCC, por sus siglas en inglés) y ferrita cuya estructura es cúbica centrada en el cuerpo (BCC, por sus siglas en inglés), ambas se sitúan en porcentajes equivalentes de 50-50% e.p. Estos son llamados dúplex debido a la presencia de las fases (a temperatura ambiente) mencionadas.

Estos materiales poseen un buen nivel de cromo que les proporciona la eficiente resistencia a la corrosión (característica importante de los aceros inoxidables ferríticos) y las excelentes propiedades mecánicas de los aceros inoxidables austeníticos. Es importante recalcar que la resistencia a la corrosión se ve disminuida al someter el material a altas temperaturas por la presencia de fases frágiles. Los DSS son considerados materiales de alta resistencia mecánica y con una óptima tenacidad. (5).

El bajo contenido de níquel, en comparación con las aleaciones austeníticas, los hace un poco más económicos, incluso teniendo mismo nivel de resistencia a la corrosión, siendo esto muy atractivo cuando se traduce en la facilidad de requerir menores cantidades de elementos aleantes para obtener buenas propiedades (4).

2.2.1.3 Clasificación de los aceros inoxidable dúplex

Los aceros inoxidable dúplex también poseen una clasificación, que mediante su desarrollo continuo ha propiciado el dividirse en cuatro tipos (**Figura 2.6**), además, la clasificación de los DSS en función de su rendimiento ante la corrosión por picaduras depende de su contenido de aleación.

La composición química es usada para la clasificación de los DSS, mediante el cálculo del número equivalente de resistencia a las picaduras (PRE, por sus siglas en inglés), algunas veces es llamado PREN, considerando el contenido de nitrógeno presente (18) (19)

$$\text{PREN} = [\% \text{ e. p. Cr}] + 3.3[\% \text{ e. p. Mo}] + 16[\% \text{ e. p. N}]$$

La adición de tungsteno en algunos DSS puede incrementar la resistencia a la corrosión, para estos casos el PREW se definirá de la siguiente manera (20):

$$\text{PREW} = [\% \text{ e. p. Cr}] + 3.3[\% \text{ e. p. Mo}] + 1.65[\% \text{ e. p. W}] + 16[\% \text{ e. p. N}]$$

La clasificación de los DSS empleando el PREN está basada como se muestra a continuación y en la **Tabla 2**:

- LEAN DÚPLEX valores menores que 30
- STANDARD DÚPLEX valores de 30
- SUPERDÚPLEX valores con 40
- HIPERDÚPLEX valores mayores de 45

Tabla 2 Composición química (% e.p.) de aceros inoxidable dúplex comúnmente empleados con la asignación del PREN correspondiente (20)

Grado	Estándar	Cr	Mo	Ni	N	Otros	PREN
2101	UNS S 32101	21	0.3	1.5	0.22		25
2202	UNS S 32202	22		2	0.20		26.5
2304	UNS S 32304	23	0.2	4.0	0.10		25
2205	UNS S 31803	22	3.0	5.3	0.17		35
2507	UNS S 32750	25	4	7.0	0.27		>40
Zenon 100	UNS S 32760	25	3.6	7.0	0.25	0.7 Cu y 0.7 W	41
2707 HD	UNS S 32707	27	4.8	6.5	0.4		49

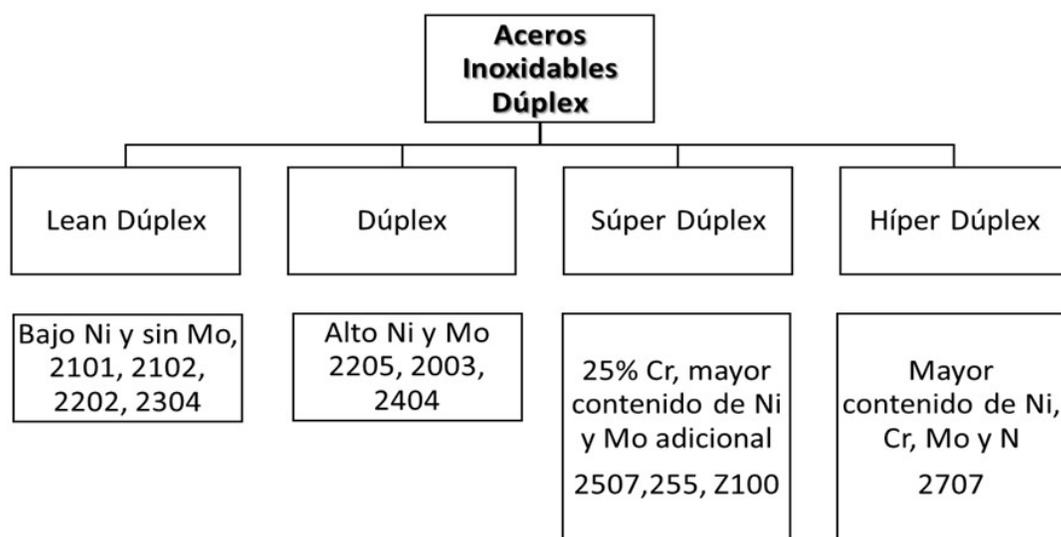


Figura 2.6 Clasificación de los aceros inoxidable dúplex

Los diversos aceros inoxidable dúplex mantienen una función específica dentro de la industria, la cual es consecuencia de su composición química, teniendo como consecuencia la variación en sus propiedades físicas y mecánicas.

2.2.1.4 Metalurgia de los aceros inoxidable dúplex

El comportamiento metalúrgico de estos aceros parte del diagrama ternario de fases Fe-Cr-Ni y como se mencionó anteriormente, para un mayor entendimiento de estos diagramas se fija uno de los elementos como constante.

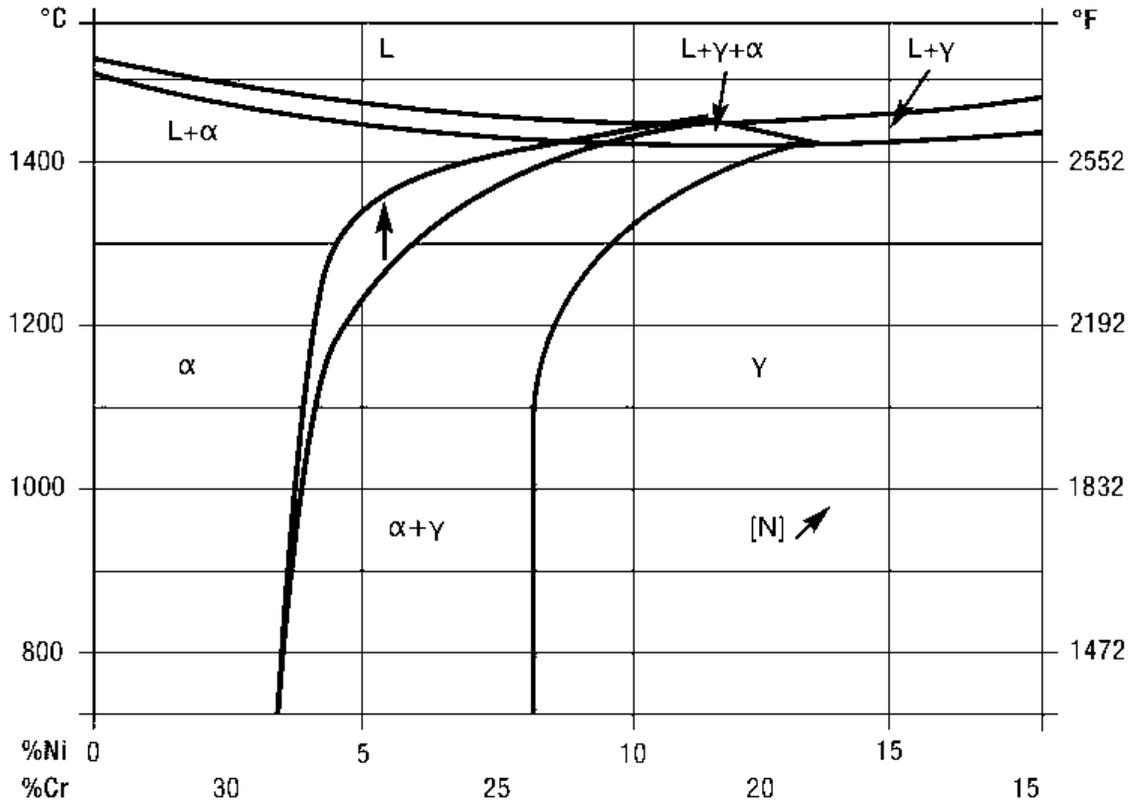


Figura 2.7 Diagrama de fases ternario Fe-Cr-Ni con 68% de Fe (21)

Observando el diagrama anterior (Figura 2.7) se puede apreciar que la austenita se forma a partir de la ferrita delta (termodinámicamente), imposibilitando que la aleación bifásica pueda ir más allá del equilibrio de la austenita. A pesar de estas condiciones, si se continúa sometiendo el DSS a enfriamientos continuos pueden aparecer diversos constituyentes microestructurales como carburos, nitruros, fase sigma (la cual puede formarse en cuestión de minutos a ciertas o determinadas temperaturas) y otros intermetálicos.

La velocidad de enfriamiento es una variable que determina la cantidad de ferrita- δ que puede convertirse en γ , sin embargo, si adicionalmente el material es expuesto a altas temperaturas también influye en el equilibrio de fase. Modificaciones en la composición química puede propiciar que las fracciones de volumen de la austenita y ferrita se vean afectadas.

Mediante el ajuste de elementos aleantes como Cr, Ni, Mo y N se mantiene el balance de fases de estos materiales. Un aspecto importante en los aceros inoxidable actuales es el alto adicionamiento de nitrógeno propiciando tres características principales en ellos (1) eleva la temperatura en donde la austenita se transforma a ferrita delta, (2) se controla el exceso de ferrita y (3) se propicia la formación de nitruros de Cr en los límites de grano.

La precipitación de las fases sigma (σ) y chi (χ) en los DSS ocurre al alcanzarse altas temperaturas al mismo tiempo que precipitan carburos y nitruros (Cr, Ni y Mo afectan la cinética de formación de estos dos últimos precipitados y si los DSS contienen altos contenidos de estos elementos la cinética de formación de la fases chi y sigma es más rápida) (4) (20) (22).

2.2.1.5 Transformaciones de fase en los aceros inoxidable dúplex

Los aceros inoxidable dúplex son materiales en los cuales pueden precipitar una diversidad de fases debido a su composición química en los rangos de temperatura se sitúen entre 300 y 1000 °C (**Figura 2.8**), además, para lograr la precipitación de estas fases se requieren tiempos de exposición suficientes a estas temperaturas, dónde la mayoría de ellas tienden a fragilizar las aleaciones dúplex, afectando su comportamiento y desempeño (4).

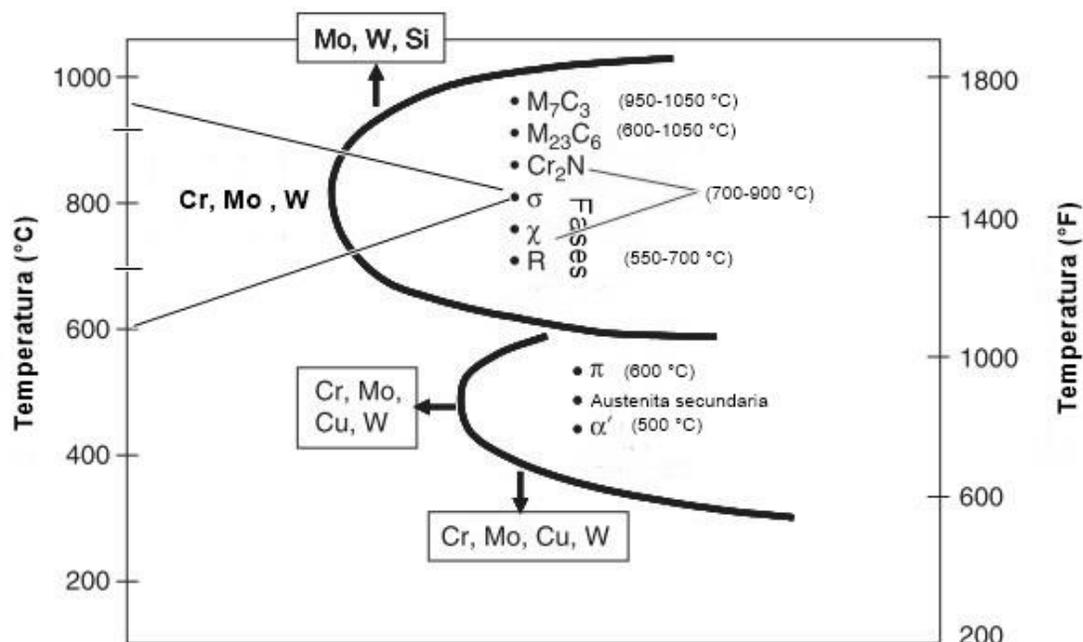


Figura 2.8 Diagrama de precipitación de fases secundarias en los aceros inoxidables dúplex (4)

Tabla 3 Características de principales fases secundarias que se forman en los aceros inoxidables dúplex

Fase sigma (σ)	Precipita generalmente en los aceros inoxidables austeníticos, ferríticos y dúplex, siendo el precipitado más significativo, debido a que mantiene altas fracciones de volumen que afectan fuertemente las propiedades mecánicas y anticorrosivas de estos materiales (esto último atribuido al empobrecimiento de Cr y Mo en el límite de grano), la precipitación de esta fase incluso si se trata de una pequeña fracción en el volumen, produce un impacto altamente perjudicial en la ductilidad y dureza del material. Los rangos de temperatura para que se genere este compuesto se sitúan entre 600-1000 °C en forma de racimo, destacando que entre 850-900 °C se produce una rápida precipitación y cuya morfología es en mariposa o partículas grandes. Es una fase característica por poseer alta dureza y estructura tetragonal con 30 átomos por celda unitaria,
---	---

constituido principalmente por Cr, Mo y Si y precipita usualmente en las uniones de puntos triples, límites de ferrita-austenita e intergranularmente (23; 24; 25).

Fase chi (χ) Precipitado con altos contenidos de Mo que aparece junto a la fase sigma en los aceros inoxidable austeníticos, ferríticos y dúplex después del proceso de envejecimiento en rangos de temperatura que comprenden los 700-900 °C. A diferencia de la fase sigma, el volumen de la fase chi no es alto, sin embargo, causa efectos perjudiciales en la dureza y propiedades de resistencia a la corrosión (20; 26)

Fase R Precipita entre los 550 y 700 °C, compuesto principalmente de Mo. Al igual que la fase chi, la fase R tiene un efecto adverso sobre la tenacidad y la resistencia a la corrosión en los DSS

Fase π Esta fase precipita intergranularmente y después de tratamientos isotérmicos a 600°C, cuya estructura cristalina es cúbica y rica en Cr y Mo y fue a menudo confundido con la fase sigma.

Carburos Compuestos intermetálicos con altos contenidos de C que se forman en los límites de grano de las fases austenita-ferrita, ferrita-ferrita y austenita-austenita. Los carburos M_7C_3 precipitan a la temperatura entre 950 y 1050°C, mientras que los carburos $M_{23}C_6$ en temperaturas debajo de 950 °C (20; 24; 27)

Nitruros de Cr Aparece en los límites de grano y se debe generalmente a la saturación con nitrógeno de la fase ferrita o durante tratamiento térmico isotérmico. Los rangos de temperatura para la precipitación de los nitruros de cromo oscilan en los 700-900 °C (20; 28).

2.2.1.6 Propiedades mecánicas

Los aceros inoxidable dúplex ofrecen alta resistencia, buena dureza y ductilidad; además algunas propiedades de estos aceros son (5):

- 1) Parcialmente magnéticos
- 2) Eficiente resistencia a la corrosión.

El resultado de la adecuada combinación de las fases presentes en los aceros inoxidable dúplex proporciona que la fase austenita tenga mayor ductilidad y la ferrita una amplia resistencia a la corrosión (especialmente, resistencia a la corrosión asistida por esfuerzos).

El adición de Mo confiere a estos aceros una mejora la capa pasivante, disminuyendo notablemente los daños al material debido a la corrosión por picaduras.

Los DSS mantienen buenas propiedades de tenacidad por efecto de la austenita, ya que esta fase retarda la fractura por clivaje. Esta propiedad se ve afectada por el efecto de la precipitación de segundas fases.

Una característica importante en estos aceros se debe a que los carburos de cromo tienden a precipitar en los límite de grano ferrita-austenita, sin embargo, el cromo necesario para la precipitación de estos compuestos es obtenido de la ferrita, evitando que exista una disminución de este elemento en el límite de grano y una posterior corrosión intergranular (17) (29).

2.2.1.7 Aplicaciones de los aceros inoxidable dúplex

Esta rama de los aceros inoxidable es aplicada en una diversidad de ambientes, servicios, industrias y demás aplicaciones.

Una de estas aplicaciones es al estar sumergidos en ambientes corrosivos incluso a bajas temperaturas.

La industria petroquímica (tubería de conducción, tanques, depósitos, intercambiadores de calor, etc.) emplea sustancialmente estos materiales debido a su resistencia al agrietamiento por cloruros.

En la industria automotriz se ha implementado progresivamente su uso, debido a las propiedades mecánicas y físicas del material. Partes de la carrocería son fabricadas con acero inoxidable dúplex, reduciendo considerablemente el peso de la misma y manteniendo la resistencia mecánica y al impacto que demanda el automóvil. Otras de las autopartes que se fabrican con este acero inoxidable son volantes, suspensiones, partes de motor, escapes, tanques de gasolina, entre otros.

Diversos grados de DSS son empleados para transportes fluidos que contienen sulfuros, los cuales pueden inducir al agrietamiento.

La industria aeroespacial y aeronáutica emplea estos materiales en la fabricación de sus productos. (4) (7) (20) (21)

2.2.1.8 Características generales del acero inoxidable dúplex 2205

Este tipo de acero inoxidable fue desarrollado para mejorar las diversas propiedades de los aceros inoxidables austeníticos y ferríticos. Es el acero inoxidable dúplex con mayor disponibilidad y comúnmente el que se emplea con frecuencia debido a la mejora de las propiedades mecánicas de los aceros arriba mencionados.

El acero inoxidable dúplex 2205 contiene 22% de cromo, 5% de níquel y 0.3% máximo de nitrógeno (N sirve para mejorar significativamente las propiedades de resistencia a la corrosión de la aleación, además da una mejora resistencia a la fluencia que es más del doble que la de los aceros inoxidables austeníticos convencionales especialmente en la condición soldada) y 3% de molibdeno lo que incrementa las propiedades de resistencia mecánica y a la corrosión localizada y por esfuerzo, además de una gran tenacidad al impacto. A pesar de poseer estas amplias ventajas el DSS 2205 no es generalmente adecuado para el uso a temperaturas superiores a 300 ° C, ya que precipitan fases quebradizas y por debajo de -50 °C disminuye su ductilidad, fragilizando el material.

Esta aleación es utilizada ampliamente para la fabricación de materiales que deban ser resistentes a la corrosión, ya que muestra una oposición a éste fenómeno por picaduras y grietas superior a la de los aceros inoxidables ferríticos y

austeníticos. Además, sus excelentes propiedades de fatiga por corrosión y erosión permiten al diseñador mejorar el funcionamiento de los productos a diseñar. El aumento de la fuerza promueve la opción de reducir el espesor de pared del tubo aun manteniendo su resistencia a los daños; lo anterior se traduce en un ahorro económico considerable.

Una posible limitación en el uso del DSS 2205 se debe a su costo, el cual es resultado principalmente de las cantidades de los elementos de aleación de Ni (nominal 5,5%) y Mo (nominal 3%) (20) (7) (30).

2.3 Proceso de Soldadura por Fricción Agitación (FSW)

2.3.1 Soldadura en estado sólido

Los procesos de soldadura en estado sólido reciben su nombre debido a que no necesitan fusión del metal base para producir la unión y el metal de aporte tampoco es usualmente requerido.

La presión y deformación proveen una significativa influencia en la soldadura durante estos procesos. La unión por difusión emplea una presión suficiente para deformar localmente los valles y colinas en las superficies de contacto; entonces, a una alta temperatura que se sitúe por debajo de la temperatura de fusión de la pieza de trabajo, a los átomos se les permite difundirse a través de la intercara rellenando los espacios vacíos y completar el proceso de unión. Se puede proveer la presión para realizar la unión por diversos métodos, cómo soldadura en frío, por explosión, forja, soldadura por fricción, ultrasónica y soldadura por fricción agitación (31).

2.3.2 Antecedentes

El proceso de Soldadura por Fricción Agitación (FSW, por sus siglas en inglés) fue inventado por Wayne Thomas en el Instituto de Soldadura de Inglaterra (TWI, por sus siglas en inglés) en 1991 cómo una técnica de unión en estado sólido e inicialmente fue considerado como una “curiosidad de laboratorio”, sin embargo, se hizo evidente que el proceso FSW ofrecía numerosas ventajas para emplearlo sobre aleaciones de aluminio, posteriormente se han desarrollado avances para su aplicación en aceros de medio carbono e inoxidables (31) (32)

2.3.3 Generalidades

El proceso FSW es una de las técnicas más recientes dentro de los procesos de soldadura en estado sólido, es decir, se produce la coalescencia del material sin alcanzar su punto de fusión, a diferencia de los procesos convencionales, permite obtener uniones a alta velocidad, sin material de aporte, y sus propiedades mecánicas y metalúrgicas son ampliamente mejoradas sin requerir una habilidad

del operario de soldadura. Todas las características anteriores auguran un amplio campo de innovadoras aplicaciones tecnológicas.

A lo largo de su desarrollo, la técnica del proceso FSW ha demostrado que es ideal para realizar uniones a tope y de traslape de buena calidad sobre una amplia serie de materiales, especialmente aquellos materiales metálicos no ferrosos, incluso aquellos que son difíciles de soldar por los procesos de soldadura convencionales (inicialmente fue implementado para las aleaciones de Al, posteriormente ampliado para todo tipo de materiales entre compuestos y aleaciones ferrosas). Durante FSW, el calor generado por la fricción de la herramienta sobre el material es empleado para promover la eventual unión del mismo con ayuda de la presión axial ejercida por el “hombro” de la herramienta (Figura 2.9). (33) (34)

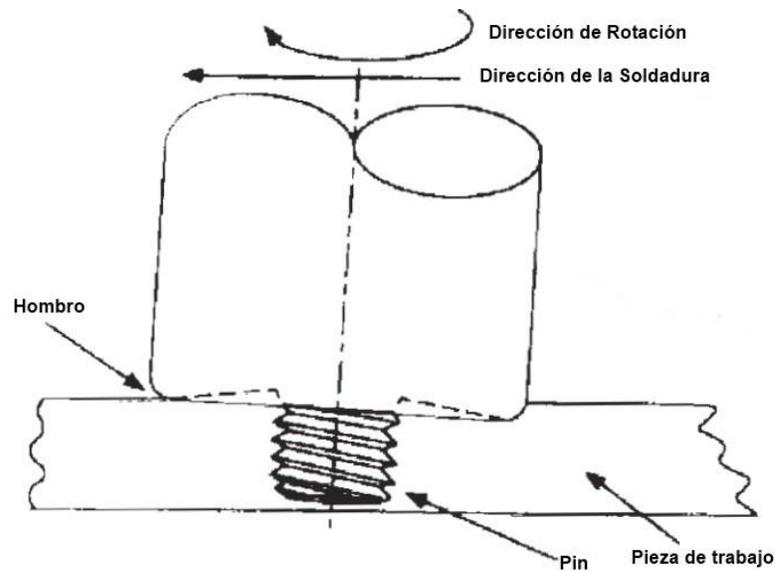


Figura 2.9 Diagrama de la herramienta de soldadura (34)

2.3.4 Principios de Operación

El funcionamiento del proceso FSW consiste en una herramienta de soldadura giratoria y no consumible denominada como “Herramienta de Soldadura” (Figura 2.9) la cual se encuentra provista de una punta inferior diseñada en diversas geometrías llamada “pin”, y en su parte superior un hombro redondeado, empleado

para producir la presión necesaria en el proceso. La metodología para realizar la coalescencia de materiales empleando el proceso FSW aparenta ser simple como se muestra en la (**Figura 2.10**), sin embargo, hay diversas características, tales como fenómenos de difusión, recristalización, etcétera que deben ser aclarados en estudios posteriores. Mencionado lo anterior, la unión de los materiales se realiza al insertar el pin de la herramienta giratoria en los bordes de contacto del material a unir, el cual se encuentra generalmente en una junta diseñada a tope. Posteriormente, la herramienta con ayuda de una carga nominal va rotando a lo largo de las superficies, donde por medio de la presión y fricción que ejerce el pin sobre lo que se está soldando se produce el calentamiento que induce a suavizar el material sin llegar a la fusión del mismo. El material suavizado se forja a través del contacto íntimo con el hombro de la herramienta y el pin. Al enfriar, se crea un lazo sólido entre las piezas de trabajo. Es importante considerar que herramienta de soldadura debe ser de un material que resista el desgaste producido por la fricción y mantenga las temperaturas de reblandecimiento necesarias para garantizar la coalescencia. (32) (34) (35) (36)

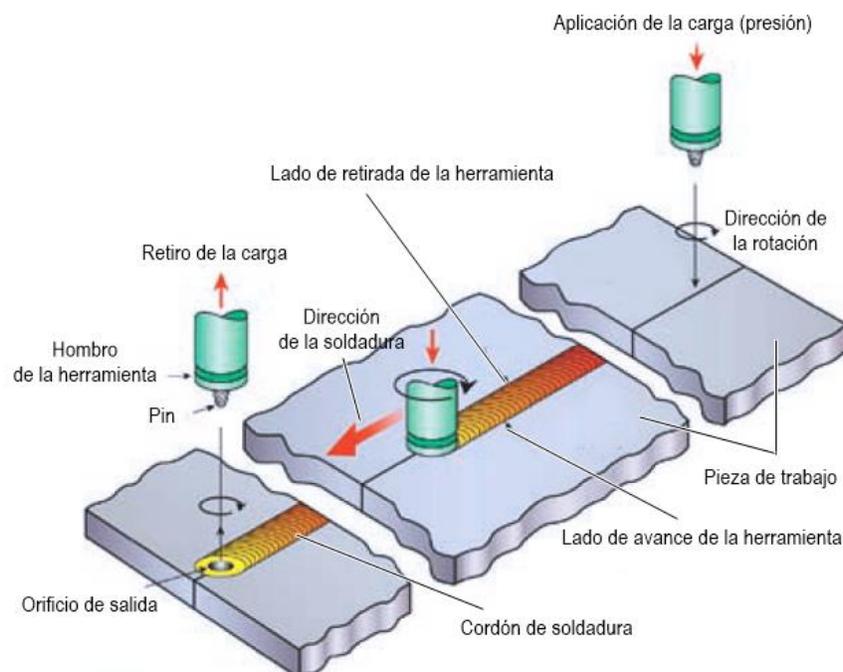


Figura 2.10 Proceso FSW (32)

2.3.5 Parámetros del proceso

Dentro del proceso de soldadura por fricción agitación se encuentran diversas variables o parámetros (**Figura 2.11**) cuya correcta aplicación determina las condiciones óptimas para el correcto desarrollo del mismo, es esencial considerar que los parámetros de FSW dependen en gran medida del tipo de aleación y/o material a emplear, así como los espesores a unir.

FSW implica el movimiento de material y su deformación plástica, dando lugar a que los parámetros de soldadura, geometría de la herramienta y diseño de la junta ejerzan un efecto significativo en el patrón de flujo de material y distribución de la temperatura, lo que influye en la microevolución estructural de material. En esta sección, se abordan algunos de los factores principales que afectan este proceso de soldadura.

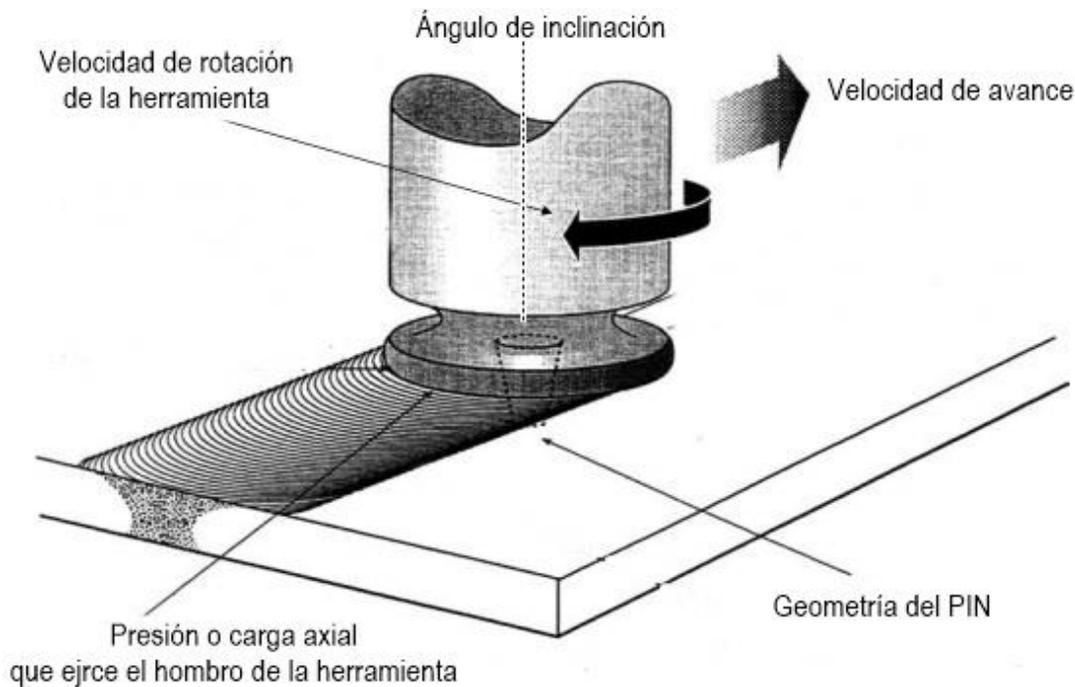


Figura 2.11 Parámetros del proceso FSW (37)

Velocidad de rotación: Es la frecuencia con la que el pin de la herramienta de soldadura gira, se encuentra medida en revoluciones por minuto (rpm). Las condiciones de este parámetro deberán ser basadas en el tipo de material que se

esté soldando. Es importante considerar que si se emplea una velocidad de rotación excesiva puede causar desgaste prematuro y roturas de la herramienta.

El uso de la velocidad de giro correcto afectará en gran medida la vida de la herramienta y la calidad o el acabado de la superficie. La velocidad depende de las siguientes condiciones:

1. Resistencia de la soldadura y la calidad de la soldadura requerida: Mayor calidad de soldadura y la fuerza pueden obtenerse en operaciones de alta velocidad.
2. Material a soldar - Material duro requiere la operación de alta velocidad.
3. Tamaño de la soldadura. Grandes soldaduras requieren funcionamiento a baja velocidad.
4. Espesor de la pieza a soldar.

Las altas tasas de rotación de la herramienta generan una mayor temperatura debido al incremento de fricción y resultan en una intensa agitación de material.

Velocidad de desplazamiento: Es la velocidad con la cual la pieza avanzó contra la pieza de trabajo, expresada normalmente en milímetros por minuto (mm/min)

El ángulo de inclinación del hombro o brazo: Una inclinación adecuada con respecto a la pieza de trabajo asegura que el hombro de la herramienta sostiene el material que se agitó, moviéndolo de manera eficiente desde la parte frontal hacia la parte posterior.

Geometría del pin y la presión o carga axial: son también parámetros que deben considerarse dentro del proceso FSW para su correcto funcionamiento. (31) (33) (38).

2.3.6 Fundamentos Metalúrgicos del Proceso FSW

2.3.6.1 Introducción

Al soldar materiales mediante el proceso de soldadura por fricción agitación, estos se ven involucrados dentro de una deformación plástica donde una porción de la energía que es producida se almacena en la muestra cuyos efectos producen defectos puntuales, de apilamiento y/o dislocaciones. El resto de la energía que no es almacenada se disipa a lo largo del material en forma de calor.

Descrito de otra manera, durante FSW el punto de fusión del material no es alcanzado, promoviendo la denominada “deformación en frío”.

Materiales que han sido trabajados en frío, por diversas operaciones industriales (**Figura 2.12**), se encuentran en un estado de energía muy alto propiciando que sean termodinámicamente inestables, adicionalmente las propiedades mecánicas y físicas del material son afectadas ligeramente, siendo necesario retornar la pieza de trabajo a sus propiedades originales, induciendo la pieza a estados de energía más bajos; el efecto de un recocido es una alternativa útil para lograr lo anterior descrito, lo cual consiste en llevar el material a altas temperaturas para que las propiedades sean recuperadas, posterior a esto conlleva un enfriamiento lento.

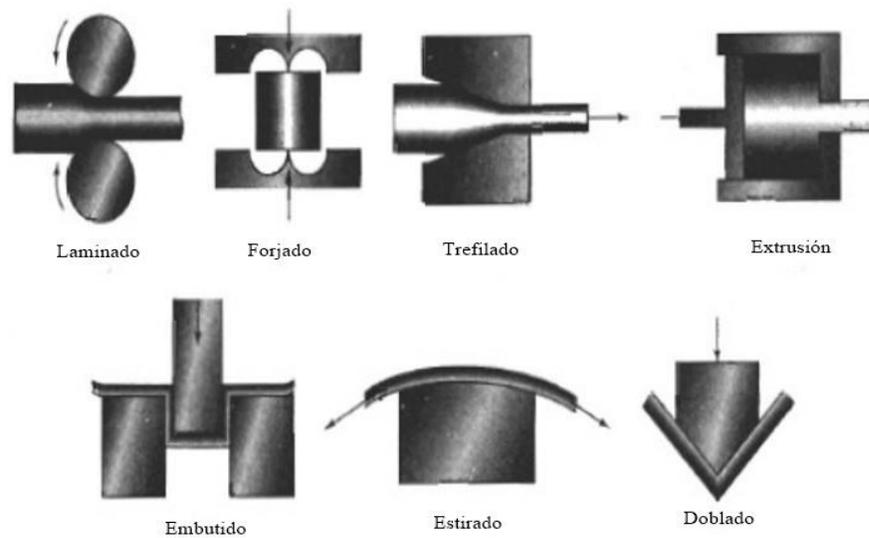


Figura 2.12 Procesos de deformado en frío (39)

Otras propiedades del material también cambiarán como resultado del proceso de recocido, típicamente la resistencia de los materiales disminuye y la ductilidad aumenta. Esta metodología empleada para eliminar las condiciones del trabajado en frío consiste en combinar los procesos de recuperación, recristalización y crecimiento de grano. (31) (38) (40) (39)

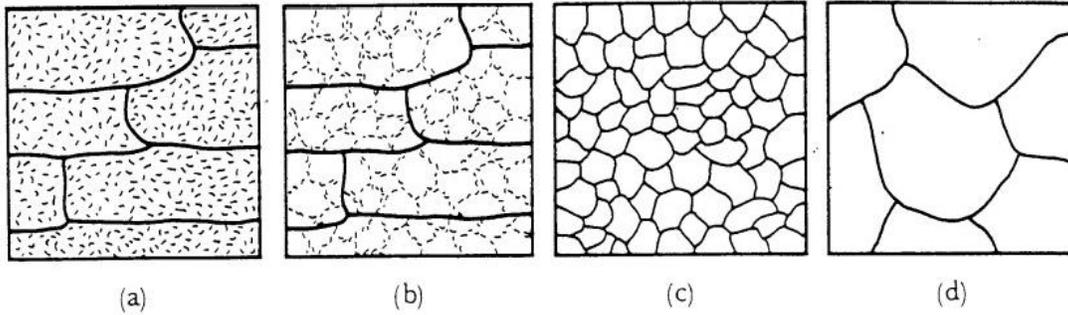


Figura 2.13 Representación esquemática de la secuencia recuperación-recristalización-crecimiento de grano (41)

2.3.6.2 Recuperación

Etapa del proceso de recocido que ocurre después de la deformación plástica del material; es un término que se emplea para describir la distribución de las dislocaciones resultantes de la deformación plástica en subgranos, límites de granos o diversos defectos, productos del trabajo en frío al que fue sometido el material.

Es importante destacar que el término recuperación no es exclusivo para materiales que han sido sometidos a trabajo en frío por efecto de cargas mecánicas externas, también puede operar en materiales que poseen dislocaciones y/o defectos puntuales, por ejemplo el bombardeo (o irradiación) de partículas aceleradas puede inducir al material a tener las mencionadas características.

El mecanismo de recuperación tiene como objetivo obtener las propiedades del material que poseía hasta antes de haber sido deformado en frío, lo anterior se logra elevando la temperatura del material para producir el movimiento de las dislocaciones y aliviar los esfuerzos resultantes del trabajo en frío.

Simultáneamente, un conjunto de fenómenos (a baja temperatura) son esenciales para el desarrollo de la recuperación:

Reducción y/o eliminación de defectos puntuales: Es llevado a cabo por la adición del calor, promoviendo la difusión de los defectos y su eventual reducción.

Poligonización: término empleado para describir la descomposición de un cristal en segmentos más pequeños formado subgranos reduciendo los defectos puntuales. Los subgranos se forman debido a que las dislocaciones se acomodan con menor energía en los cristales más pequeños.

Desarrollo de núcleos recristalizados: Es el proceso mediante el cual se obtienen puntos de nucleación que pueden dar inicio a las posteriores etapas del recocido (nucleación y crecimiento del grano).

Durante el reordenamiento o eliminación de las dislocaciones en el proceso de recuperación, los límites de grano en el material no se mueven; el proceso de recuperación se produce más o menos homogéneamente por todo el material, sin embargo, el proceso de recuperación puede ser descrito en las variantes siguientes.

2.3.6.2.1 Recuperación estática

Si la recuperación es inducida, después de la deformación plástica (realizada por trabajo en frío), empleando el recocido a temperatura elevada (claramente por debajo de la temperatura de fusión) las dislocaciones de la zona microestructural deformada se reorganizarán formando un grupo de granos libres de deformación.

2.3.6.2.2 Recuperación Dinámica

Si la deformación plástica se produce a temperatura elevada (como por laminación en caliente) y se ejecutan los procesos de recuperación mientras que el material todavía se está deformando; se habla entonces de la recuperación dinámica (31) (41)

2.3.6.3 Recristalización

La recristalización es un proceso de nucleación y crecimiento controlado por la activación térmica y cuya fuerza motriz es la energía almacenada en forma de dislocaciones.

Al igual que la recuperación, la recristalización es una de las etapas del proceso de recocido que ocurre cuando un metal previamente deformado en frío y posteriormente recuperado es calentado por encima de una temperatura mínima que requiere cada metal o aleación. Durante la recristalización se forman un conjunto de granos o cristales equiaxiales libres de deformación con baja densidad de dislocaciones y composición similar a los granos del material previo a su deformación plástica. El resultado del proceso de recristalización son estructuras refinadas, homogéneas y como se mencionó, con granos equiaxiales.

El proceso de recristalización es dividido en la forma que se recristalarán los granos nuevos:

Recristalización Continua: Etapa en la cual se promueve la creación de límites de deformación para obtener posteriormente límites de grano; durante la recristalización continua los granos nuclean en granos ya existentes.

Recristalización Discontinua: Los granos durante esta etapa son originados en los límites de grano, se acumulan en esas zonas disminuyendo su crecimiento y provocando que la recristalización se detenga.

El tamaño que tenga el grano resultante de la recristalización va a depender de la deformación que haya sido acumulada en el material por efecto de la deformación en plástica, si la deformación es elevada, el tamaño de grano será muy fino; caso contrario si la cantidad de deformación es pequeña, el tamaño de grano será más grueso.

Existen diversos aspectos que se deben considerar al momento de estudiar el concepto de recristalización

Grado de deformación: Se refiere a la cantidad de energía almacenada en el material producto de la deformación, indicando la cantidad de energía disponible para iniciar la recristalización, tipo de nucleación y lugares donde se crearán los nuevos granos.

Tamaño inicial del grano: Existen diversos efectos que condicionan el que la recristalización se lleve a cabo con mayor velocidad en materiales que tienen un tamaño de grano más fino.

Elementos en solución sólida: Elementos como Mn, P, Si entre otros pueden influir en la migración de las fronteras de grano, pudiendo reducir la movilidad en diferentes órdenes.

Segundas fases: Cuando dentro de los metales o aleaciones se precipitan segundas fases, éstas juegan un papel importante en la nucleación y crecimiento del grano. El tamaño y la distribución de las segundas fases determinarán si pueden llegar a propiciar la nucleación o inhibirla

De la misma forma que la recuperación, dentro del proceso de recristalización predominan dos vías para este proceso

2.3.6.3.1 Recristalización estática

Mediante la recristalización estática las dislocaciones situadas en la microestructura del material son reorganizadas propiciando la generación de nuevos granos libres de deformación. El proceso comienza cuando finaliza la deformación ya sea en frío o caliente y los metales o aleaciones son calentados por encima de la mitad de su punto de fusión ($0.5 T_m$, T_m temperatura de recristalización).

2.3.6.3.2 Recristalización dinámica

Ocurre durante la deformación en caliente, empleando una temperatura superior a $0.5 T_m$. La recristalización dinámica produce nuevos granos gradualmente y nuclean en los límites de grano. (41) (39) (40)

2.3.6.4 Crecimiento de grano

Última etapa del proceso de recocido, ocurre después de la recristalización, la microestructura del material se ve engrosada impulsada por la liberación de energía del límite de grano.

Durante este proceso los granos pequeños son encogidos y los granos largos crecen debido a que la energía proveniente de la deformación disminuye produciendo que crezcan nuevos granos al moverse la interfase del grano recristalizado-deformado. (40)

2.3.7 Aspectos generales del desarrollo microestructural en materiales soldados por FSW

Las aleaciones de aluminio han sido el principal material soldado mediante el proceso FSW, por tal razón, las diversas regiones que se muestran en la soldadura realizada sobre los aceros inoxidables dúplex se han nombrado de acuerdo a las encontradas en micro/macrografías al soldar el aluminio (**Figura 2.14**).

Diversos autores han realizado análisis en la microestructura de la zona soldada mediante diversas técnicas de caracterización microestructurales como microscopía óptica, microscopio de orientación de imágenes, microscopía electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés) equipada con un sistema de análisis de espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS, por sus siglas en inglés), entre otros. El conjunto de técnicas anteriores aunado al previo conocimiento adquirido permite la comprensión de las diversas microestructuras que son producidas en las uniones realizadas por el proceso FSW en el acero inoxidable dúplex.

Los cambios microestructurales que se obtienen son producto de las variaciones del proceso de soldadura, dando como resultado el desarrollo de diversos procesos y/o fenómenos como precipitación de segundas fases, disolución, recristalización, recuperación y crecimiento de grano, entre otros.

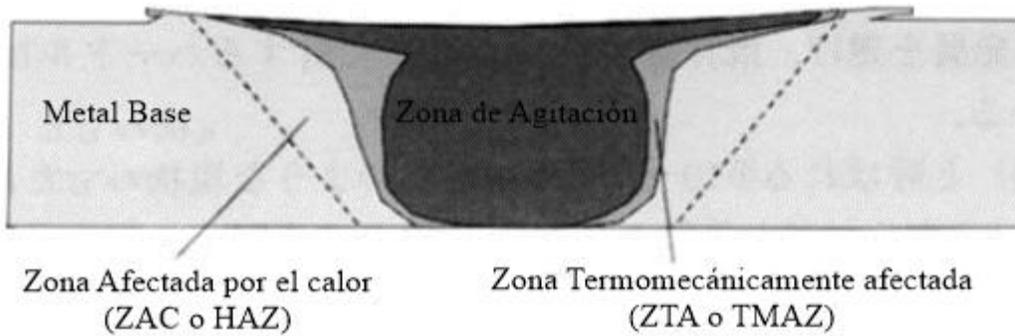


Figura 2.14 Diagrama de la sección transversal de una soldadura producida por FSW (42)

En la **Figura 2.15** es posible avistar diversas zonas características en la soldadura del acero inoxidable dúplex 2205 por el proceso de fricción agitación, el lado derecho e izquierdo del centro de soldadura están relacionados con los lados de avance y en retirada, respectivamente. La microestructura de la soldadura puede ser clasificada en tres diferentes secciones de acuerdo a la investigación realizada:

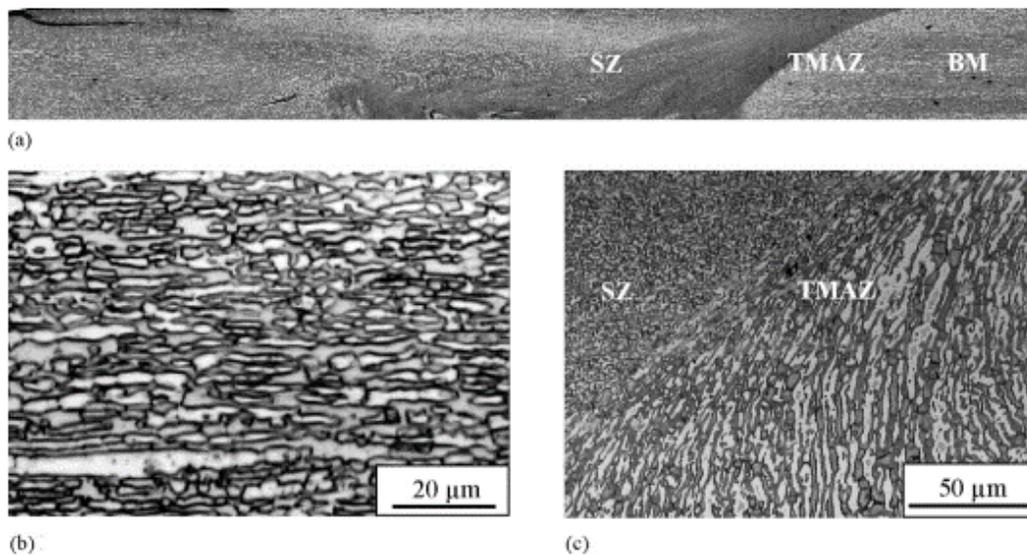


Figura 2.15 Macro-micrografía de la zona soldada, mostrando diversas zonas microestructurales (600 rpm y 200 mm/min): (a) Macrografía de la zona soldada; (b) Metal base y (c) Zona de Agitación y TMAZ (43)

El metal base (BM, por sus siglas en inglés). Región que no ha sido sometida a efectos del calor producido por el proceso, las propiedades y microestructura original no se ven afectadas por la soldadura. La **Figura 2.15 (b)** muestra parte del metal base donde las islas blancas de austenita (γ) están incrustadas en una matriz gris de ferrita (α). Ambas fases tienen formas alargadas con fracciones de volumen de 0,51 y 0,49, respectivamente, medida obtenida por metalografía cuantitativa. La técnica de análisis de EDS se utilizó para identificar la partición de los elementos de aleación en cada una de las fases. Los resultados se resumen en la **Tabla 4**.

Tabla 4 Composición química (% e.p.) de austenita y ferrita en el DSS 2205 (43)

Fases	Cr	Mo	Ni	Mn
Ferrita	24.30	2.98	5.07	0.85
Austenita	20.78	1.75	7.78	1.67

Zona de Agitación (SZ, por sus siglas en inglés): Región en la que se aprecian granos equiaxiales, conteniendo material que ha interactuado directamente con la herramienta de soldadura. En esta sección se experimentan elevadas tensiones y altas velocidades de deformación, además, las temperaturas más altas son registradas esta zona debido al calor friccional promoviendo la deformación plástica dando como resultado la recristalización del material y la formación de nuevos granos. Los diversos granos finos y equiaxiales son producto de la recristalización dinámica; que de acuerdo a los principios generales de la recristalización, puede ocurrir de manera discontinua (nucleación de nuevos granos y es presentada en materiales con baja energía de falla de apilamiento) o continua (granos nuclean en granos existentes y se da en materiales de alta energía de falla de apilamiento) En la **Figura 2.15** es posible observar que un incremento en la velocidad de soldadura reduce el tamaño de grano recristalizado. Una elevada velocidad rotacional a baja velocidad de soldadura reduce el tamaño de grano debido a que una alta velocidad de rotación incrementa el grado de deformación reduciendo el tamaño de grano recristalizado. Sin embargo, al aumentar este último parámetro del proceso, la

temperatura incrementa promoviendo que sean formados granos gruesos recristalizados. Lo anterior indica que la variación del tamaño de grano dependerá que factor sea predominante en el proceso FSW.

Zona Termomecánicamente Afectada (TMAZ, por sus siglas en inglés): Al igual que en la SZ se observan granos finos y equiaxiales debido a los efectos del calor y elevada deformación mecánica a la que se somete el acero.

Cabe señalar que el límite TMAZ / SZ en el lado de avance de la herramienta es más intensa que en el lado de retirada. Esto indica la asimetría de la soldadura por fricción-agitación. Los granos en este proceso se re-orientan perpendicularmente a la dirección transversal de la soldadura de la placa de base debido a la acción de agitación de la herramienta giratoria.

En todas las regiones de la soldadura es posible apreciar que se encuentran constituidas por una matriz de ferrita con islas de austenita, similar al metal base.

Zona térmicamente afectada o zona afectada por el calor (HAZ, por sus siglas en inglés): Región más alejada de la SZ, se experimentan altas temperaturas que pueden causar cambios metalúrgicos en el metal base sin haber estado sujeto a deformación plástica, Es un punto de notable interés, que esta zona no fue claramente observada en las soldaduras de los aceros inoxidable dúplex unidos mediante el proceso de soldadura por fricción agitación, debido a que es un proceso en estado sólido y para su realización se emplea un sistema de enfriamiento en la herramienta de soldadura que extrae gran parte del calor generado, lo que resulta en uniones sanas, es decir, sin zonas que pongan en riesgo su rendimiento.

De acuerdo a micrografías de la SZ obtenidas por microscopía óptica, en el caso de los DSS, un refinamiento de la fase matriz y una uniforme distribución de las segundas fases son importantes para mejorar las propiedades mecánicas y especialmente inducir la súper plasticidad. Un punto importante que se obtuvo fue que las microestructuras resultantes en la SZ revelan que el proceso FSW produce estructuras microdúplex en una relativa facilidad y con un solo paso del proceso y puede ser potencialmente considerado como una alternativa para el proceso

termomecánico (la microestructura dúplex es obtenida comúnmente por un apropiado y complejo proceso termo mecánico). (38) (33) (44) (42) (43) (45) (46) (47).

2.3.8 Ventajas y limitaciones del proceso

Las diversas ventajas del proceso de soldadura por fricción agitación se deben, como se mencionó anteriormente, a que éste es un procedimiento en estado sólido de alta eficiencia mecánica para la coalescencia de metales, produciendo uniones a tope y traslape con eficiencias de hasta el 90%; las principales ventajas de la soldadura por fricción agitación sobre los procesos de soldadura convencionales son los descritos a continuación:

Tabla 5 Ventajas del proceso FSW (31) (38) (48)

METALÚRGICAS
Una amplia gama de aleaciones de Al, que son complicadas de soldar por métodos convencionales, pueden ser unidas mediante FSW.
Menor generación de calor, reduciendo los problemas que producen los procesos de fusión en las propiedades mecánicas.
Efectos de distorsión y tensiones residuales son relativamente pequeños, especialmente en placas delgadas de material.
Los problemas que comúnmente son encontrados en la soldadura convencional, i.e. agrietamiento y/o formación de cavidades por efecto de atmósferas protectoras no tienen efecto en esta soldadura.
Es posible soldar de manera óptima en una sola pasada y con penetración profunda, sin la necesidad de aplicar un tratamiento post-soldadura además las velocidades de avance son mayores que en otras metodologías de soldadura.
FSW es un proceso que permite la completa automatización, necesidad de contar con un soldador experimentado.
El proceso permite obtener microestructuras de grano fino.

AMBIENTALES

Evita la emanación de gases y residuos de arco eléctrico.

Ahorro de energía (2.5% de la energía necesaria para soldadura láser).

PREPARACIÓN DE MUESTRAS

No se requiere limpieza exhaustiva para realizar la unión.

OTRAS

No requiere de atmósferas protectoras ni materiales de aporte.

FSW es un proceso que permite la completa automatización, sin la necesidad de contar con un soldador experimentado.

A pesar de ser una metodología de soldadura con amplias y óptimas características, posee desventajas que limitan su uso con diversos materiales y en diversos ambientes.

Tabla 6 Desventajas del proceso FSW (48) (31)

LIMITACIONES

El procedimiento FSW generalmente se aplica a materiales con baja resistencia y bajo punto de fusión (los materiales que posean punto de fusión elevado requieren de herramientas diseñadas con características para proveer calor suficiente y suavizar el material, además que su diseño debe contener al material suavizado y producir la coalescencia).

Las piezas a unir deben estar firmemente sujetadas para poder llevar a cabo la unión.

Su principal limitación radica en que es una aplicación altamente costosa, debido a que el 'pin' (pieza con alto costo económico) se desgasta con facilidad y debe ser repuesto o re-fabricado constantemente.

La lentitud del proceso, debido a que se debe alinear, sujetar y acomodar las piezas de trabajo es una limitación importante.

Se requieren máquinas con mayor potencia para unir piezas de alto grosor.

El procedimiento FSW generalmente se aplica a materiales con baja resistencia y bajo punto de fusión (los materiales que posean punto de fusión elevado requieren de herramientas diseñadas con características para proveer calor suficiente y suavizar el

material, además que su diseño debe contener al material suavizado y producir la coalescencia).

Las piezas a unir deben estar firmemente sujetadas para poder llevar a cabo la unión.

2.3.9 Calidad de la soldadura producida por FSW

La calidad de la unión realizada mediante la soldadura por fricción agitación está relacionada directamente con los parámetros y variables empleadas para llevar a cabo el proceso de unión de los materiales con los cuales se está trabajando.

Es importante tener en claro que las discontinuidades presentes en las uniones que se efectúan bajo el proceso FSW son diferentes a las encontradas en los procesos de soldadura por fusión que se emplean comúnmente, ya que la porosidad, fisuras, inclusiones provenientes del metal de aporte y/o atmósfera gaseosa protectora son totalmente eliminadas; a pesar de la apreciable eliminación de estas discontinuidades, surgen otras que deben ser investigadas y analizadas para evitar la obtención de piezas con mala calidad.

Actualmente se han identificado dos tipos de discontinuidades para el proceso FSW, las que están relacionadas con el procedimiento y las que su naturaleza es del tipo metalúrgica. (44) (49)

2.3.9.1 Discontinuidades de procedimiento

Las diversas discontinuidades relacionadas con el procedimiento son mostradas en la **Figura 2.16**

Falta de penetración en la base de la soldadura: Ocurre debido a que el PIN de soldadura no es lo suficientemente largo para efectuar de manera correcta la soldadura provocando que exista una región en la base de la soldadura sin unirse debido a que el “nugget” de soldadura no logra extenderse con uniformidad.

Desajuste o incompatibilidad de las uniones: Discontinuidad provocada por la falta de alineación de las piezas a unir o bien si los parámetros de soldadura del proceso no son los correctos para obtener una unión sana.

Exceso de rebaba producto del proceso de soldadura en la unión: Defecto ocurrido por el empleo incorrecto de la posición y fuerza de aplicación del hombro de la herramienta, así como una selección incorrecta del mismo. Simultáneamente a esta discontinuidad, ocurre el llenado por debajo del borde límite de soldadura, produciendo que la zona de agitación se encuentre más delgada que el metal base.

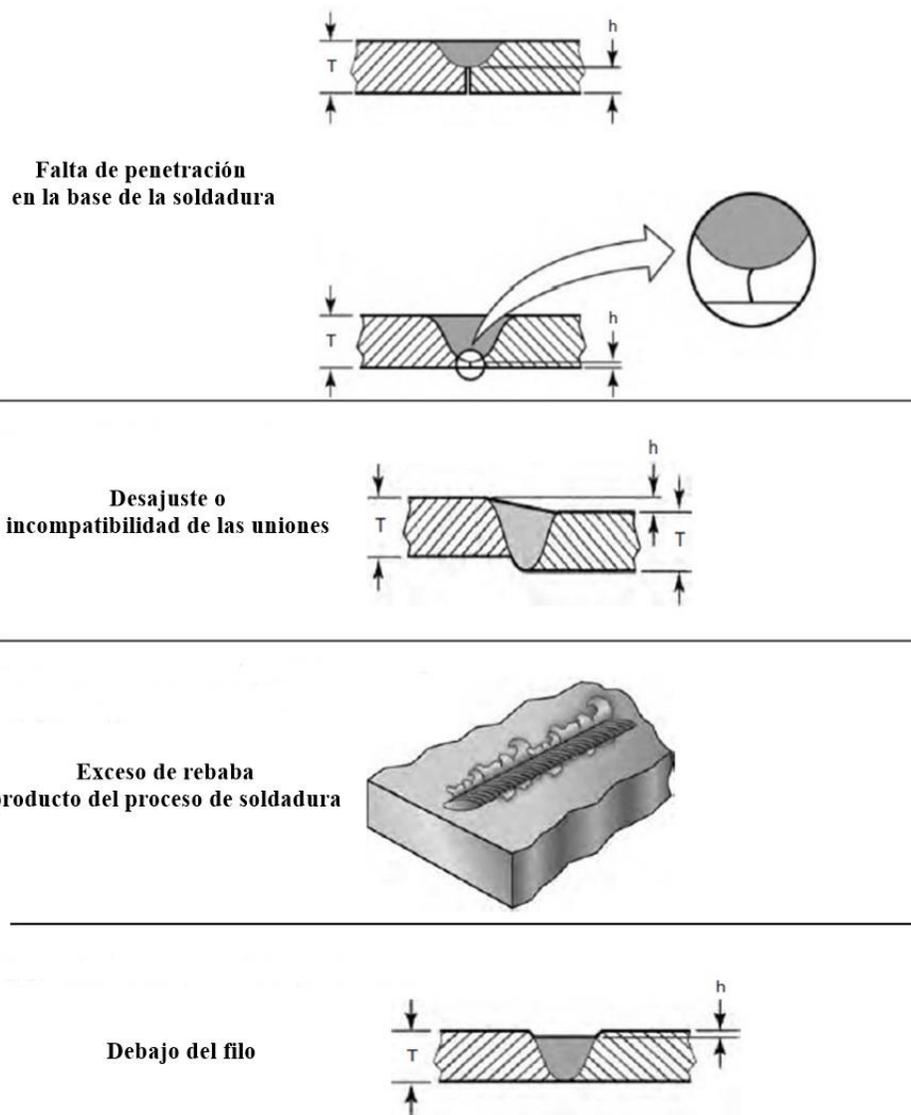


Figura 2.16 Tipos de discontinuidades de soldadura producidas por FSW (44)

2.3.9.2 Discontinuidades metalúrgicas

Las discontinuidades cuya naturaleza es metalúrgica refieren a la unión incompleta de las superficies que se estén trabajando (**Figura 2.17**)

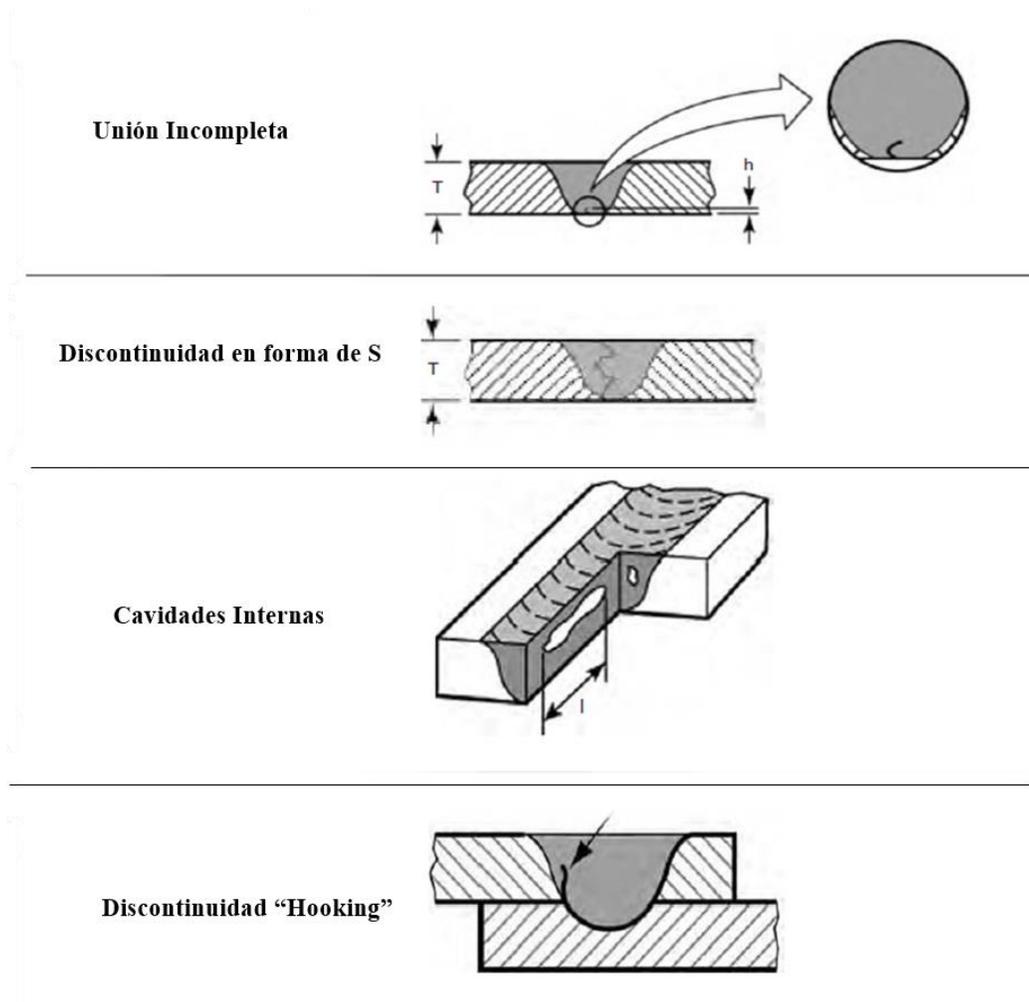


Figura 2.17 Discontinuidades metalúrgicas producidas por el proceso FSW
(44)

Unión incompleta: Discontinuidad que promueve el inicio de grietas y corrosión en las piezas de trabajo.

Discontinuidad de forma S: Debe su nombre a la morfología que se forma en la pieza soldada, esta discontinuidad puede ser evitada por la eliminación de óxidos de superficie antes de la soldadura o por un cambio en el diseño de la herramienta.

Cavidades internas: Efecto que se produce por una incorrecta aplicación de los parámetros de soldadura (falta de aplicación de la carga axial) y/o mal uso de la herramienta. Es importante considerar que si la velocidad de rotación de la herramienta es muy elevada, se podría formar una discontinuidad de “agujero de gusano” que podría extenderse hacia la superficie de la pieza, dejando una zanja como resultado.

Discontinuidad “Hooking”: Producida comúnmente en las juntas de traslape, ocurre al moverse la interfaz cercana a la zona de agitación, provocando la reducción de la efectividad del espesor de la soldadura. (49) (44)

2.3.10 Aplicaciones del proceso FSW

El empleo de la soldadura por fricción agitación está principalmente en la manufactura de aplicaciones para la industria marina y automotriz, debido a la preservación de las propiedades mecánicas del material, i.e. éstas no se ven afectadas sustancialmente comparadas con las resultantes de un proceso convencional de soldadura por fusión. Dentro de esta gama de industrias, sus aplicaciones están relacionadas con la fabricación de depósitos de combustibles, volantes, suspensiones, estructura de asientos para pasajeros, pisos de aeronaves, tanques de almacenamiento, etc.

Además, FSW es aplicado en la manufacturas de diversos componentes de la industria ferroviaria y aeronáutica.

2.3.11 FSW aplicado en aceros inoxidables dúplex 2205

2.3.11.1 Efecto de la velocidad de avance y rotación en las uniones del acero inoxidable dúplex 2205 por FSW

T. Saeid, A. Abdollah-zadeh y colaboradores, realizaron un estudio para investigar el efecto de la velocidad de soldadura del proceso FSW en la microestructura y propiedades mecánicas de la zona de agitación (SZ, por sus siglas en inglés) de un acero inoxidable dúplex 2205.

Se analizó la soldadura a tope en una placa de acero inoxidable dúplex 2205 cuya composición química y propiedades termo-físicas se presentan en la **Tabla 7**

Tabla 7 Composición química del DSS 2205 (% e.p.) (43)

Elemento	Cr	Ni	Mo	Mn	C	P	S
% e.p.	22.31	5.48	3.34	1.42	0.03	0.023	0.005

La soldadura por FSW fue llevada a cabo empleando una herramienta de soldadura fabricada en carburo de tungsteno (WC); realizándose 5 soldaduras (con una longitud cada una de 270 mm) a una velocidad de rotación de 600 rpm, sin embargo, se emplearon diferentes velocidades de soldadura (traslación) para estudiar su efecto, dichas velocidades fueron de 50, 100, 150, 200 y 250 mm/min. Mediante radiografía con rayos X (**Figura 2.18**) se observó que hasta velocidades de 200 mm/min se obtienen buenas soldaduras, sin embargo, a velocidades superiores de 250 mm/min un defecto de ranura es observado en el lado de avance, cabe destacar que este defecto puede degradar severamente las propiedades mecánicas del metal soldado. Estudios previos demostraron que los defectos de ranura son principalmente formados cuando el calor de entrada en el proceso FSW es insuficiente (en esta situación, el material no puede fluir fácilmente para rellenar la brecha generada por la herramienta del proceso). La velocidad de soldadura tiene una gran influencia en la entrada de calor, con el aumento de ésta, la entrada de calor se reduce gradualmente hasta que el calor producido por la fricción-agitación es insuficiente para permitir el flujo del material visco plástico, promoviendo que el defecto de ranura sea más probable que ocurra.

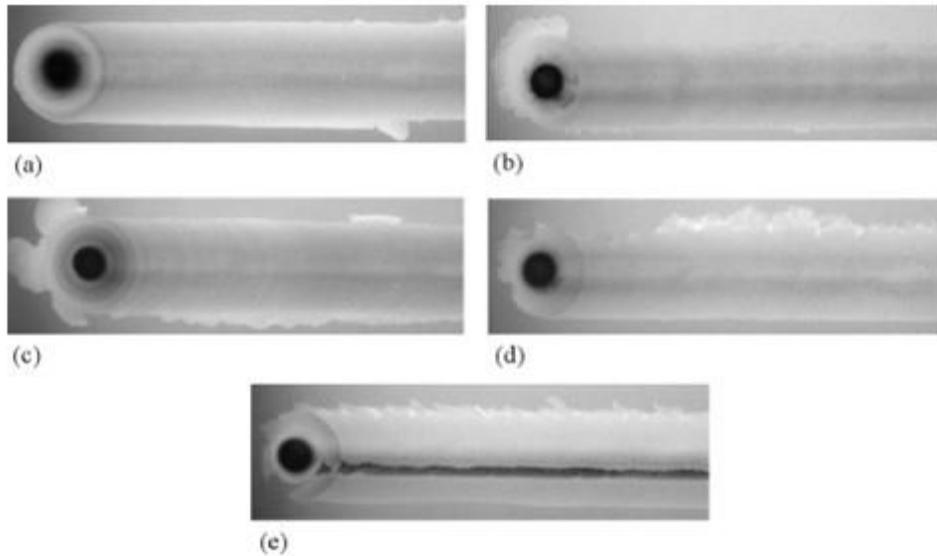


Figura 2.18 Radiografías de uniones realizadas por FSW a diferentes velocidades. (a) 50 mm/min; (b) 100 mm/min; (c) 150 mm/min; (d) 200 mm/min; (e) 250 mm/min. (43)

En la **Figura 2.19** se presenta un perfil típico de temperaturas y temperaturas máximas registradas de una buena soldadura realizada a diferentes velocidades de soldadura. Se observa que la temperatura máxima decrece con el incremento de la velocidad de soldadura manteniendo constante la velocidad rotacional. Diversos estudios concluyen que en el proceso FSW, ambas velocidades de rotación (w) y de soldadura (v) ejercen un efecto significativo en el pico de temperatura (43) (45).

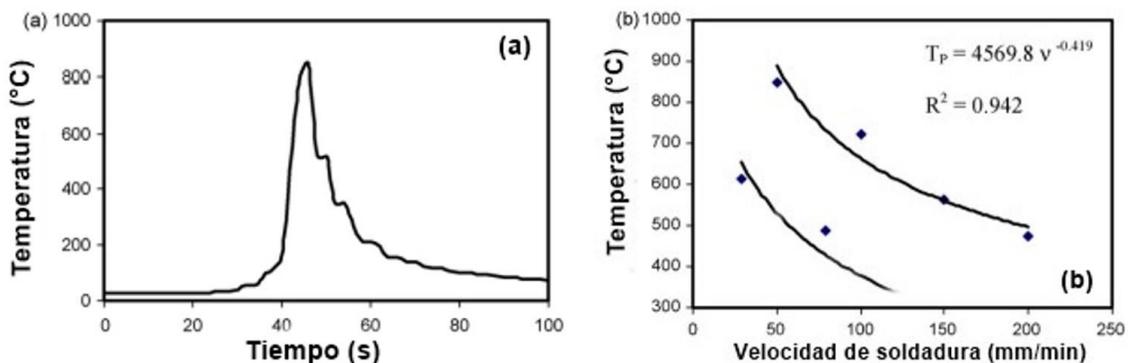


Figura 2.19 Medición de la T (a) 50 mm/min; (b) en función de la velocidad de soldadura (43).

M. Esmailzadeh y colaboradores, al realizar la unión de un acero inoxidable lean dúplex (**Tabla 8**) encontraron que el control de la generación de calor durante el proceso FSW al soldar este tipo de materiales es esencial para comprender el desarrollo de la microestructura. El calor generado es causado debido a que la herramienta de rotación provoca un incremento de temperatura en la superficie a soldar, debido a la fricción entre la herramienta y la superficie en la interfase. Actualmente se han desarrollado diversos modelos matemáticos que permiten predecir la cantidad de calor generado en función de las diversas mediciones de temperatura del proceso, longitudes de la superficie a unir y constantes propias de la transferencia de calor.

Tabla 8 Composición química (% e.p.) del DSS Lean dúplex 2101 (46)

Elemento	Cr	Ni	Mo	Mn	C	P	S
% e.p.	21	5.3	0.2	0.5	0.9	<0.04	<0.03

En la **Figura 2.20** se puede observar el perfil de temperaturas obtenido al realizar la unión de este acero inoxidable dúplex, las velocidades de soldadura empleadas fueron de 50, 100 y 150 mm/min y además, se reportaron las diversas velocidades de enfriamiento para cada valor anterior, las cuales fueron de 26.08, 54.5 y 60 °C/s, respectivamente. Notándose que a una mayor velocidad de avance, el enfriamiento procede con menor rapidez, lo cual resulta en uno de los factores que podrían influir en el desarrollo del proceso de recristalización de las uniones.

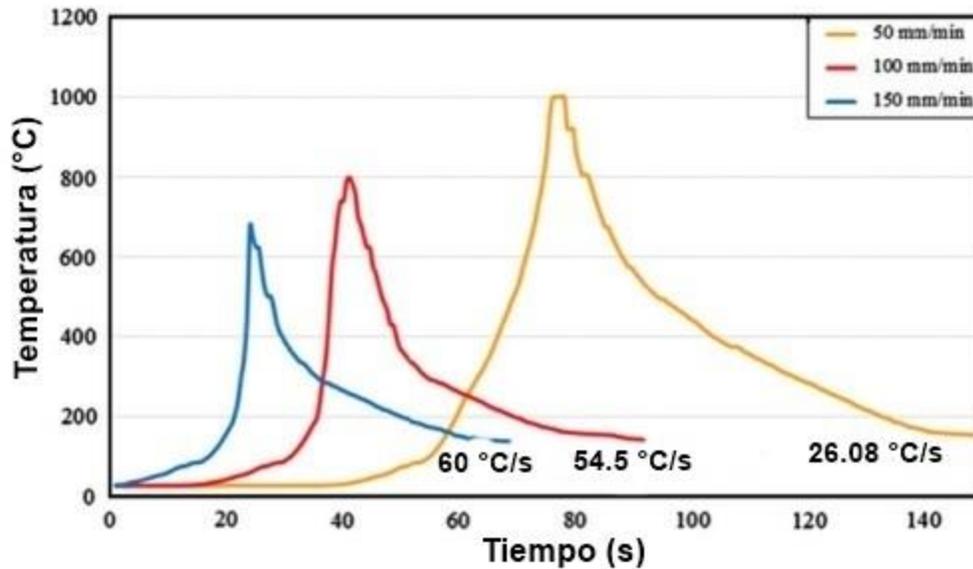


Figura 2.20 Perfil de temperaturas a diferentes velocidades de soldadura (46).

De la figura anterior se observa que la temperatura máxima alcanzada es de 1000 °C, lo cual es menor a la temperatura de austenización de la fase ferrita (1250 °C, para este tipo de aceros inoxidables dúplex). El perfil de temperatura indica que conforme la velocidad de soldadura aumenta, la temperatura en la SZ disminuye, es decir, se mantiene un comportamiento inversamente proporcional.

Estudios previos han determinado un parámetro de amplio interés que relaciona el tamaño de grano con las velocidades de soldadura (v) y rotación (w): *revolution pitch* es un espaciado lineal que se forma durante una revolución. A una velocidad rotacional constante, este último incrementará su valor al aumentar la velocidad de soldadura. A un mayor valor de *revolution pitch* el tamaño de grano decrece considerablemente, además que la velocidad de deformación aumenta (46).

$$\text{Ecuación no. (1)} \dots \dots \dots \text{ Revolution pitch} = \frac{v}{w}$$

2.3.11.2 Formación de segundas fases y precipitados en las uniones de DSS 2205 mediante el proceso FSW

I. Calliari y colaboradores, estudiaron la influencia de las fases intermetálicas en la reducción de la resistencia a la fractura de un DSS 2205 está fuertemente ligada a la precipitación de diversas fases intermetálicas ocurridas en los rangos de 600 a 1000 °C, cabe destacar que incluso a temperatura ambiente puede verse reducida la tenacidad de acero inoxidable dúplex cuando existen cantidades menores al 1% de partículas intermetálicas. El efecto de las fases secundarias sobre la tenacidad es evidente a partir del 0,5% fracción de volumen de estos compuestos (23) (50).

Empleando técnicas de caracterización, como difracción de rayos X, es posible conducir los resultados a la ausencia de fases fragilizadoras que podrían formarse a alta y/o baja temperatura. La fase sigma, característica en los aceros inoxidables, no se observa en los diversos patrones de difracción. A pesar que las temperaturas alcanzadas en este proceso son idóneas para la formación de compuestos y/o fases fragilizadoras, el tiempo de exposición es muy corto, lo que imposibilita su eventual aparición (43).

2.3.11.3 Influencia en las propiedades mecánicas

Los perfiles de dureza para el acero inoxidable dúplex 2205 soldado por FSW a diferentes velocidades son los mostrados en la **Figura 2.21**. Básicamente la dureza en la zona de agitación es más alta que el metal base. Dado que la relación de austenita y ferrita a lo largo de la zona de soldadura es aproximadamente igual al metal base, el incremento de la dureza podría estar relacionado con el pequeño tamaño de grano de las fases ferrita y austenita en esta zona.

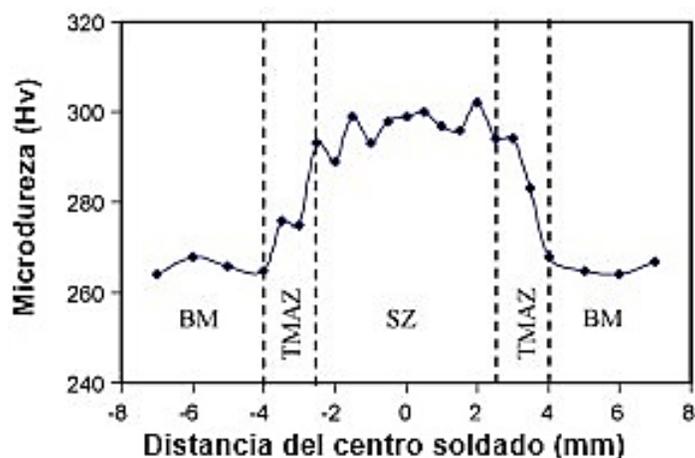


Figura 2.21 .Perfil de micro durezas (600 rpm-50 mm/min) (43).

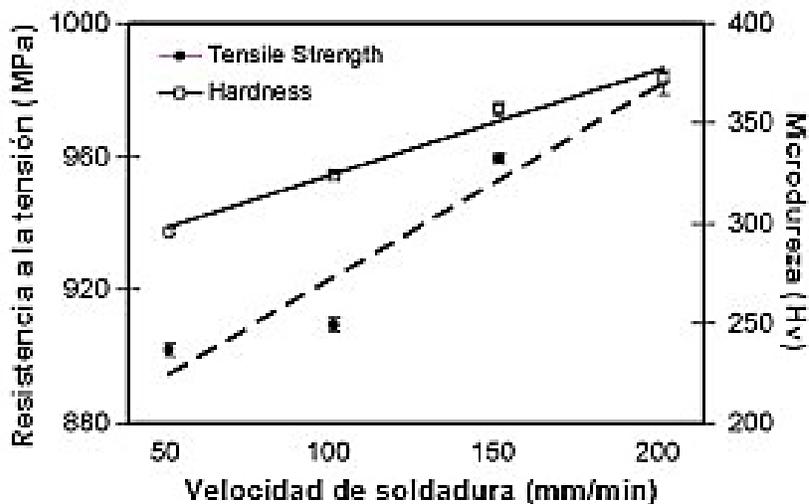


Figura 2.22 Efecto de la velocidad de soldadura en la dureza y resistencia a la tensión (43)

Además el tamaño de grano es un factor dominante en las propiedades mecánicas del material. En la **Figura 2.22**, la dureza y resistencia a la tensión son presentadas en función de la velocidad de soldadura, mostrando el mismo comportamiento que los perfiles de dureza; ambas propiedades se ven incrementadas en la zona de agitación (43) (46) (47).

2.3.11.4 Formación de la estructura de grano en aceros inoxidables dúplex sometidos al proceso de soldadura por fricción agitación

Recientemente, Saeid et al. han demostrado que el grado de refinamiento de grano depende considerablemente de la velocidad de soldadura, sin embargo, el mecanismo de refinamiento de grano es necesario comprenderlo para definir y obtener la microestructura deseable en los DSS cuando son soldados mediante el proceso de soldadura por fricción agitación. Los mecanismos que se asume actúan en el crecimiento de grano en la zona de agitación están basados en que la recrystalización dinámica discontinua ocurre en la fase austenita y la recrystalización dinámica se lleva a cabo en la fase ferrita.

Un estudio realizado por T. Saeid, A. Abdollah-zadeh y colaboradores, empleando acero inoxidable dúplex 2205 en forma de placa, investigaron la evolución de la microestructura en FSW de acero inoxidable dúplex así como el estudio del crecimiento de grano. La velocidad de rotación de la herramienta de soldadura fabricada de WC fue de 800 rpm y una velocidad de soldadura de 50 mm/min. En la **Figura 2.23** se pueden apreciar las dimensiones de la herramienta empleada.

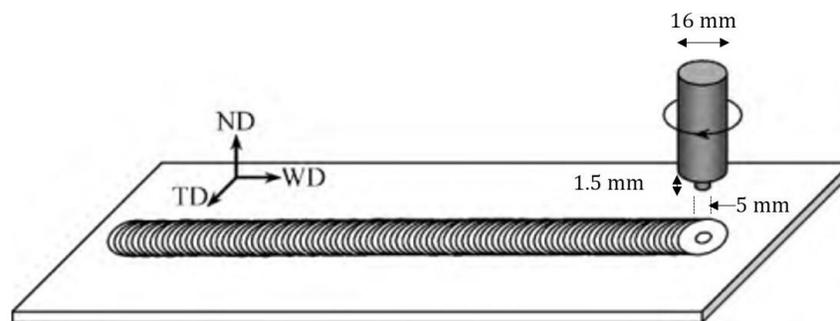


Figura 2.23 Esquema del proceso FSW realizado (45)

De los resultados de los procedimientos experimentales se encontró mediante una macrografía óptica tres distintas zonas en el material (1) zona de agitación, (2) metal base y (3) zona termomecánicamente afectada (**Figura 2.24**). Y en **Tabla 9** se presentan las características microestructurales (tamaño de grano y fracción de cada fase) obtenidas mediante difracción de electrones retro-dispersados

Tabla 9 Porcentaje de fase y tamaño de grano de diferentes secciones de soldadura (45)

	BM	TMAZ (Lado de Avance)	SZ (Lado de Avance)	SZ (Centro)	SZ (Lado de Retroceso)
Tamaño de grano de α (μm)	7.04	4.14	0.73	0.84	1.21
Tamaño de grano de γ (μm)	5.16	3.45	0.66	0.75	0.91
Fracción de cada fase α/γ	51.5/48.5	54/46	51.5/48.5	52.3/47.7	51.8/48.2

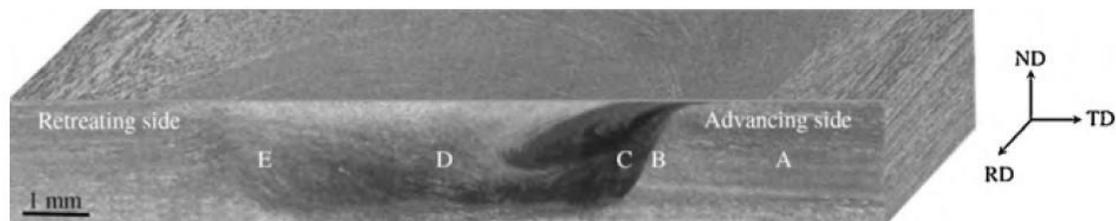


Figura 2.24 Macrografía óptica del DSS 2205 después del proceso FSW. Región (A) Metal Base; (B) TMAZ; Región (C-E) SZ (45)

Además, se observó que en la zona de agitación (SZ), una recristalización dinámica continua (CDRX) se presentó en la fase ferrita, mientras que una recristalización estática junto con CDRX puede ocurrir en la fase austenita del material. Por otra parte, las variaciones de tamaño de grano y características texturales mostradas en

la **Figura 2.25** demostraron que el aumento de la deformación plástica en el lado de avance de la SZ produce granos finos recristalizados (45).

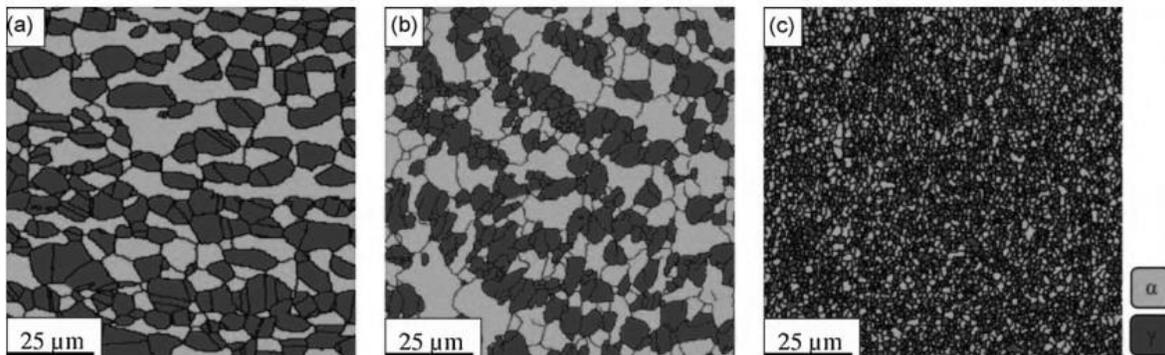


Figura 2.25 Mapeo de fases mostrando diversas zonas microestructurales en la zona soldada. (a) BM; (b) TMAZ; (c) SZ (45)

CAPÍTULO 3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE BIBLIOGRAFÍA

En base a la revisión bibliográfica realizada en el capítulo anterior es pertinente sostener un análisis sobre la aplicación del proceso en estado sólido, de soldadura por fricción agitación (FSW, por sus siglas en inglés) en el acero inoxidable dúplex 2205, así como proporcionar una concisa información acerca de los cambios que se producen en las uniones soldadas por este proceso, tanto en la microestructura del material como en algunas de las propiedades mecánicas del mismo.

Los aceros inoxidables dúplex son materiales que combinan una excelente resistencia a la corrosión y óptimas propiedades mecánicas, ambas características se derivan de la microestructura dual de austenita y ferrita, donde cada una de las fases proporcionan al acero sus idóneas particularidades resultando en un material resistente y funcional para diversas aplicaciones en la industria. Sin embargo, los aceros inoxidables dúplex son susceptibles a perder su equitativa dualidad de fases al ser sometidos a procesos convencionales de soldadura por fusión, lo que se traduce en la pérdida de sus propiedades mecánicas y microestructurales; adicionalmente, la elevada entrada de calor de estos procesos propicia la aparición de fases sigma, chi y/o compuestos intermetálicos como nitruros, carburos, austenita secundaria, entre otros, los cuales son en su mayoría perjudiciales. De

manera que la aplicación del proceso FSW, al ser en estado sólido y que no sobrepasa el punto de fusión del acero, resulta adecuado para mantener las características apropiadas de este material.

Es importante puntualizar que es escasa la información existente sobre la aplicación del proceso FSW en aceros inoxidable dúplex debido a un conjunto de características limitantes: el proceso de soldadura por fricción agitación es un método de unión que inicialmente fue desarrollado para ser aplicado en aleaciones ligeras o materiales con una baja temperatura de ablandamiento, debido a que una de las mayores restricciones para aplicar este proceso en materiales ferrosos, como el acero inoxidable, ha sido la falta de una herramienta de soldadura adecuada para unir materiales con alta temperatura de ablandamiento, siendo necesario que ésta deba ser resistente al desgaste físico y químico, poseer suficiente resistencia mecánica a elevadas temperaturas y una efectiva disipación del calor durante el proceso de soldadura. A pesar de esto, se ha logrado realizar investigaciones del proceso FSW en aceros inoxidables a causa de la reciente fabricación de algunas herramientas realizadas en diversas series de carburo de tungsteno (WC) y nitruro de boro cúbico policristalino (PCBN) cuyas propiedades parecen ser capaz de cumplir los requerimientos necesarios para soldar materiales ferrosos, debido a su elevada resistencia al desgaste.

En la bibliografía consultada, se identifica que al soldar el acero inoxidable dúplex 2205 se producen uniones con buena continuidad y sin defectos superficiales y/o internos. Es preciso señalar que la temperatura alcanzada por el proceso al realizar la soldadura en el DSS, de acuerdo a la literatura, no sobrepasa el punto de fusión del material y a pesar de que las temperaturas registradas son las apropiadas para la aparición de segundas fases y/o compuestos intermetálicos perjudiciales, no es posible detectarles debido a que el proceso de soldadura por fricción agitación emplea tiempos de exposición cortos a estos registros térmicos, resultando insuficiente para la formación de fases sigma, chi, nitruros, etc.

La literatura reporta que los elevados esfuerzos a alta temperatura que se producen a lo largo de la superficie del material, por efecto de la fricción generada

mediante la herramienta de soldadura promueven que el material sea deformado severamente, lo cual propicia que exista un refinamiento de la matriz ferrítica y de las islas de austenita. Dentro del análisis bibliográfico se sitúa que la generación de granos finos y equiaxiales a causa de la deformación, en el lado de avance de la zona de agitación, es el resultado de un proceso de recristalización del tipo dinámica.

De igual forma, el control y/o variación de los diversos parámetros del proceso (velocidad de soldadura, de rotación, presión axial, medios de enfriamiento, entre otros) son importantes para controlar la temperatura del proceso y la cantidad de deformación, produciendo microestructuras con tamaño de grano idóneo para las aplicaciones del material. En los aceros inoxidables dúplex, un refinamiento de su microestructura resulta benéfico para las propiedades mecánicas, aumentando su dureza y resistencia a la tracción.

CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES

Partiendo de los objetivos planteados al inicio en esta monografía y en base a la revisión bibliográfica se pueden vislumbrar las siguientes conclusiones:

- Dentro de la bibliografía consultada existe una reducida información sobre la aplicación del proceso FSW en aceros inoxidables dúplex, debido a diversas limitantes al soldar materiales ferrosos como el diseño de una herramienta adecuada, que evite su desgaste al realizar la soldadura.
- Las microestructuras generadas por el proceso FSW en estos materiales, muestra que se encuentran constituidas de granos finos, recristalizados y equiaxiales en las diversas zonas de la unión, producto de una recristalización dinámica continua a causa de la elevada deformación.
- El proceso de soldadura por fricción agitación propicia la ausencia de segundas fases y compuestos intermetálicos perjudiciales que afectan la microestructura y propiedades mecánicas del acero inoxidable dúplex y que tienden a formarse a temperaturas entre los rangos de 300-1000 °C, debido a los cortos tiempo de exposición a las temperaturas alcanzadas en la soldadura.
- Manteniendo una velocidad rotacional del herramental constante y una velocidad de avance de la soldadura inferior a los 250 mm/min se obtienen soldaduras sin defectos, debido a que se genera el calor de entrada adecuado para la unión.
- El tamaño de grano recristalizado es un factor predominante en la evaluación de la dureza y resistencia a la tracción del acero, debido que al tener un grano fino propicia el aumento de éstas propiedades.

- Resulta factible soldar aceros inoxidable dúplex mediante el proceso FSW sin estropear sus propiedades mecánicas, así como predecir la entrada de calor y el grado de deformación que tendrá el material, al soldarlo vía fricción agitación, si se tiene un control adecuado de los diversos parámetros del proceso.
- Es recomendable realizar estudios más profundos en los mecanismos de recristalización que se presentan al soldar el acero inoxidable mediante el proceso de soldadura por fricción agitación, para un mayor entendimiento de la formación y tamaño de grano en estos materiales. Además, es necesario ampliar la gama de herramientas de soldadura por FSW para aceros inoxidables, con el objetivo de realizar mayores y mejores investigaciones de este proceso en materiales ferrosos.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Funcionamiento de la capa pasiva en los Aceros Inoxidables (5).....	9
Figura 2.2 Diagrama de fases Fe-Cr (14).....	14
Figura 2.3 Proyecciones liquidus y sólidos de un sistema de aleación ternario Fe-Cr-Ni (14).....	16
Figura 2.4 Secciones de un diagrama de fases de un sistema de aleación Fe-Cr-Ni ternario (15).....	16
Figura 2.5 Clasificación de los Aceros Inoxidables (4)	18
Figura 2.6 Clasificación de los aceros inoxidables dúplex	21
Figura 2.7 Diagrama de fases ternario Fe-Cr-Ni con 68% de Fe (21)....	22
Figura 2.8 Diagrama de precipitación de fases secundarias en los aceros inoxidables dúplex (4)	24
Figura 2.9 Diagrama de la herramienta de soldadura (34)	30
Figura 2.10 Proceso FSW (32)	31
Figura 2.11 Parámetros del proceso FSW (37).....	32
Figura 2.12 Procesos de deformado en frío (39).....	34
Figura 2.13 Representación esquemática de la secuencia recuperación-recristalización-crecimiento de grano (41).....	35
Figura 2.14 Diagrama de la sección transversal de una soldadura producida por FSW (42).....	40
Figura 2.15 Macro-micrografía de la zona soldada, mostrando diversas zonas microestructurales (600 rpm y 200 mm/min): (a) Macrografía de la zona soldada; (b) Metal base y (c) Zona de Agitación y TMAZ (43)	40
Figura 2.16 Tipos de discontinuidades de soldadura producidas por FSW (44).....	46
Figura 2.17 Discontinuidades metalúrgicas producidas por el proceso FSW (44).....	47

Figura 2.18 Radiografías de uniones realizadas por FSW a diferentes velocidades. (a) 50 mm/min; (b) 100 mm/min; (c) 150 mm/min; (d) 200 mm/min; (e) 250 mm/min. (43)	50
Figura 2.19 Medición de la T (a) 50 mm/min; (b) en función de la velocidad de soldadura (43).	50
Figura 2.20 Perfil de temperaturas a diferentes velocidades de soldadura (46)	52
Figura 2.21 .Perfil de micro durezas (600 rpm-50 mm/min) (43).	54
Figura 2.22 Efecto de la velocidad de soldadura en la dureza y resistencia a la tensión (43)	54
Figura 2.23 Esquema del proceso FSW realizado (45)	55
Figura 2.24 Macrografía óptica del DSS 2205 después del proceso FSW. Región (A) Metal Base; (B) TMAZ; Región (C-E) SZ (45)	56
Figura 2.25 Mapeo de fases mostrando diversas zonas microestructurales en la zona soldada. (a) BM; (b) TMAZ; (c) SZ (45)	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Efecto de los elementos aleantes en la microestructura y propiedades de los aceros inoxidables (1; 4; 7; 8; 9; 10; 11; 12).	11
Tabla 2 Composición química (% e.p.) de aceros inoxidables dúplex comúnmente empleados con la asignación del PREN correspondiente (20) 21	21
Tabla 3 Características de principales fases secundarias que se forman en los aceros inoxidables dúplex	24
Tabla 4 Composición química (% e.p.) de austenita y ferrita en el DSS 2205 (43).....	41
Tabla 5 Ventajas del proceso FSW (31) (38) (48).....	43
Tabla 6 Desventajas del proceso FSW (48) (31).....	44
Tabla 7 Composición química del DSS 2205 (% e.p.) (43).....	49
Tabla 8 Composición química (% e.p.) del DSS Lean dúplex 2101 (46)51	51
Tabla 9 Porcentaje de fase y tamaño de grano de diferentes secciones de soldadura (45).....	56

BIBLIOGRAFÍA

1. **Cano, Pablo Gerardo Ramírez.** *Caracterización de películas pasivas formadas sobre aceros inoxidable en soluciones modelos del poro de concreto.* Monterrey, Nuevo León : Tesis (Maestría en Ciencias con orientación en Ingeniería Cerámica), 2002.

2. **Ospina López, R., Aguirre Corrales, H. y Parral, H.** *Soldabilidad en Aceros Inoxidables y Disimiles.* Universidad Tecnológica de Pereira : s.n., 2007. ISSN 0122-1701.

3. **Krauss, G.** *Steels. Processing, Structure and Performance .* United States of America : ASM International, 2005.

4. **Lippold, John C. y Kotecki, Damian J.** *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels.* United States of America : John Wiley & Sons, Inc., 2005. 2005. 0-471-47379-0.

5. **Campbell, R.D.** *The Professional's Advisor on Welding of Stainless Steels.* United States of America : American Welding Society, 1999.

6. **The European Stainless Steel Development Association.** *Decapado y Pasivado del Acero Inoxidable.* Luxemburgo : Euro Inox, 2004.

7. **Outokumpu.** *Handbook of Stainless Steels.* Suecia : Outokumpu Publisher, 2013.

8. **Peckner, D. y Bernstein , I. M.** *Handbook of Stainless Steels.* New York, U.S.A. : McGraw Hill, 1997.

9. **Clayton , C. R. y Olefjord , A.** *Passivity of Austenitic Stainless Steel.* United States of America : Marcel Dekker, Inc., 1995.

10. **Sedriks, A. John.** *Corrosion of Stainless Steels*. United States of America : Wiley InterScience, 1996.
11. **Kubaschewski, O.** *Iron: Binary Phase Diagrams*. New York : Springer-Verlag, 1982.
12. **Irvine, J. J.** *Journal of the Iron and Steel Institute*. London, U.K. : s.n. 199:153-169.
13. **Folkhard, E.** *Welding Metallurgy of Stainless Steels*. Berlín : Springer-Verlag, 1998.
14. **ASM International.** *ASM Metals Handbook*. 8th. United States of America : s.n. Vol. 8.
15. **Lippold, John C. y Savage, W. F.** *Solification of austenitic stainless*. United States of America : Welding Journal, 1979. 59:587-596.
16. **American Welding Society (AWS) Subcommittee on Certified Welding.** *Standard for AWS Certification of Welding Inspectors*. Miami, Florida. : American Welding Society, 2006.
17. **International Molybdenum Association.** *Directrices Prácticas para la Fabricación de los Aceros Inoxidables Dúplex* . Londres : IMQA, 2012. 978-1-907470-02-8.
18. **Brozda, J. y Lomozik, M. .** *Welding of stainless-duplex steels. Properties of welded*. s.l. : Department for Investigations into Weldability and Welded Constructions. Institute of Weldin, 2002.
19. **Karlsson , L.** *Welding of stainless steels. Duplex and superduplex steels*. Suiza : s.n., 2000.
20. **Miranda Pérez, A.F.** *Solid State Phase Transformations in Advanced Steels*. Padova : Università Degli Studi di Padova, 2010.

21. *Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels*. **International Molybdenum Association IMO**A. London, U.K. : IMO, 2014.
22. **Badaji, R., y otros.** *Phase Transformation and Mechanical Behavior in Annealed DSS 2205*. París, Francia : Elsevier, 2007.
23. **Calliari, I.** *Precipitation of secondary phases in Superduplex Stainless Steel Zeron 100* . s.l. : Materials Science and Technology., 2010.
24. **Villalobos, D.I.** *Precipitación de la fase sigma bajo la aplicación de ciclos térmicos en un acero inoxidable dúplex SAF 2507*. Morelia, Michoacán : Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, 2011.
25. **Ezuber, H., El-Houd, A. y El-Shawesh, F.** *Effects of Sigma Precipitation on Sweater Pitting of DSS*. Tripoli, Lybia : Elsevier, 2006.
26. **Escriba, D.M., y otros.** *Chi-Phase Precipitation in Duplex Stainless Steels*. Sao Paulo, Brasil : Elsevier, 2009.
27. **Gunn, R.** *Stainless Steels: Microstructure, Properties and Applications*. Cambridge, U.K. : Abington Publishing, 2003.
28. **Herrera López, M.E.** *Efecto de los parámetros de soldadura por fusión en la precipitación de segundas fases en uniones de aceros inoxidables dúplex*. Saltillo, Coahuila : Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. [Monografía], 2014.
29. **Mora Guzmán, S.** *Fabricación y Caracterización microestructural de un Acero Inoxidable Dúplex 2205*. Ciudad de México, D.F. : Instituto Politécnico Nacional. ESIQIE, 2007.
30. **Sandmeyer Steel Company.** Sandmeyer Steel Company. Acero Inoxidable Duplex/Súper Duplex 2205. [En línea] [Citado el: 29 de Marzo de 2015.] <http://www.sandmeyersteel.com/Spanish/2205.html>.

31. **Mishra, R.S. y De Nilesh Kumar, P.S.** *Friction Stir Welding and Process: Science and Engineering*. Suiza : Springer International Publishing. SpringerLink.
32. **Hirano, S.** *Technical Handbook of Friction Stir Welding*. Japan : Japan Weld Society, 2008.
33. **Franco, F., Sánchez , H. y Betancourt, D.** *Comparación de la junta en esta sólido mediante FSW y arco eléctrico en aleación AZ31*. s.l. : Sci Tech, 2007.
34. **Kumar, K., y otros.** *An Investigation of Friction During Friction Stir Welding of Metallic Materials*. Bangalore, India. : Materials and Manufacturing Processes,, 2009.
35. **Fukuda, T.** *Friction stir welding (FSW) process*. Japan : Journal of Japan Welding Society, 2001.
36. **Sato, Y.S. y KOKAWA, H.** *Friction Stir Welding (FSW) Process*. Japan : Journal Welding. Japan Welding Society, 2003.
37. **Santiago , D., y otros.** *Análisis de Defectos en Soldadura por Fricción Agitación mediante un modelado 3D*. Santa Fé, Aregnita : Asociación Argentina de Mecánica Computacional. Universidad Nacional de Mar de Plata, 2006.
38. **López Bustos, Z. L.** *Estudio de Herramienta de Simulación por elemento finito en el proceso FSW aplicado en aleaciones de Al*. Saltillo, Coahuila : Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. [Monografía], 2012.
39. **Meléndez, E., Lara, L. y Chanes, G.** *Recristalización durante la deformación en caliente de un acero 8620-H*. s.l. : Revista Latinoamericana de Metalurgia y Metales, 1985.
40. **ASM International.** *Recovery, Recrystallization, and Grain-Growth Structures*. s.l. : ASM Handbook Vol. 9: Metallography and Microstructures, 2004.
41. **Humphreys, F.J. y Hatherly , M.** *Recrystallization and related annealing phenomena*. s.l. : Encyclopedia of Materials Science and Engineering, 2004.

42. **Hidetoshi, F.** *Friction stir welding of steels*. s.l. : Journal of the Japan Welding Society, 2008.

43. **T. Saeid, A. A., Assadi, H. y Malek Ghaini, F.** *Effect of friction stir welding speed on the microstructure and mechanical properties of a duplex stainless steel*. Tehran, Iran : Materials Science and Engineering. ELSEVIER, 2008.

44. **Lienert Chair, T.J., y otros.** *Friction Stir Welding. Welding Handbook Chapter 7th*. s.l. : AWS, 2009.

45. **T. Saeid, A., y otros.** *On the formation of grain structure during friction stir welding of duplex stainless steel*. 2010 : Materials Science and Engineering. ELSEVIER.

46. **Esmailzadeh, M., y otros.** *Microstructure and mechanical properties of friction stir welded lean duplex stainless steel*. Irán : Materials Science & Engineering. Elsevier, 2012.

47. **Sato, Y.S., y otros.** *Microstructure and mechanical properties of friction stir welded SAF 2507 super duplex stainless steel*. Japan : Materials Science and Engineering. Elsevier, 2005.

48. **López-Angulo, J.M., y otros.** *Microestructura y dureza del aluminio AA7075 soldado por fricción agitación*. Pachuca, Hidalgo : Memorias del XIX Congreso Internacional Anual de la SOMM, 2013.

49. **Çam , G. y Mistikoglu, S.** *Recent Developments in Friction Stir Welding of Al-alloys*. s.l. : ASM International, 2014.

50. **Calliari, I., y otros.** *Investigation of secondary phase effect on 2205 DSS fracture toughness*. s.l. : La Metallurgia Italiana. Associazione Italiana di Metallurgia, 2008.

51. **Wentrup, H. y Reif, O.** *Archiv fuer das Eisenhuettenwesen*. 1949. 20:359-362.

52. **Cattaneo, C.A. y Silvetti, S.P.** *Cinética de Recristalización en Aleaciones Bifásicas*. Salta, Argentina : Asociación Argentina de Mecánica Computacional, 2012.

53. **Gagnepain, J.C.** *Duplex stainless steels: success story and growth perspectives*. Le Creusot, France : s.n., 2008.

54. **Groenewoud , K.** *Applications of Ferritic-Austenitic Stainless Steels in oil and gas production*. U.K. : s.n., 1982.