

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

**Innovación del proceso de fabricación del acero inoxidable super
dúplex ASTM A 890 grado 5A**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Metalurgista

Elaborado por

Cristhian Eduar Pérez Reynoso

 [0009-0006-1476-7992](https://orcid.org/0009-0006-1476-7992)

Asesor

Ing. Leoncio Quiñones Castillo

 [0009-0008-9392-0784](https://orcid.org/0009-0008-9392-0784)

LIMA – PERÚ

2023

Citar/How to cite	Pérez Reynoso [1]
Referencia/Reference	[1] C. Pérez Reynoso, " <i>Innovación del proceso de fabricación del acero inoxidable super dúplex ASTM a 890 grado 5A</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2023.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Pérez, 2023)
Referencia/Reference	Pérez, C. (2023). <i>Innovación del proceso de fabricación del acero inoxidable super dúplex ASTM a 890 grado 5A</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

*Para mi querida familia por su comprensión
y ayuda para la elaboración de esta tesis*

Agradecimientos

En primer lugar, doy gracias a mis padres Felisa y Luis, quienes fueron siempre el motor que impulsa mis sueños y esperanzas, ustedes estuvieron siempre apoyándome y dándome fuerzas de día y noches durante mis horas de estudio. Ustedes me han guiado hasta esta parte de mi vida.

En segundo lugar, agradezco a la empresa Metalurgia del Fierro y el cobre SAC (MEFICO), por permitir desarrollar mi tesis, brindándome sus laboratorios y apoyarme en todo momento hasta culminar mi tesis.

En tercer lugar, agradezco a los profesores de la Universidad Nacional de Ingeniería, los doctores Clemente Luyo y Robert Paria de la Facultad de Ciencias por su apoyo en la microscopía electrónica de barrido, al profesor Manuel Cruz de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica por su apoyo en las pruebas de corrosión.

Finalmente, agradezco a mis asesores y profesores de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica quienes me formaron para ser un profesional competitivo. Hoy les dedico este logro con todo cariño como una meta más conquistada en mi vida.

Resumen

El presente trabajo pretende estudiar la fabricación de piezas fundidas en acero inoxidable super dúplex según norma ASTM A 890 grado 5A en horno de inducción. Entre las piezas a fabricar tenemos tuberías, impulsores y otros accesorios de bombas usados en la industria peruana. Este acero tiene algunas ventajas con respecto a los aceros inoxidables austeníticos, este tipo de acero tiene una mejor resistencia mecánica y una gran resistencia a la corrosión. Teniendo como objetivo principal la fabricación de este tipo de acero inoxidable que cumplan los estándares internacionales de calidad que satisfaga el mercado peruano.

En primer lugar, se recopiló información de normas internacionales para determinar los parámetros de procedimiento, control de calidad y propiedades en la fabricación del acero inoxidable super dúplex. En segundo lugar, se aplica un modelo experimental basado en la fabricación de aceros inoxidables fundidos en hornos de inducción, donde la composición y la temperatura de tratamiento térmico están dentro del rango de la norma ASTM A 890. Además, el parámetro de tratamiento térmico fue importante debido a que este proporcionó una disolución de carburos y el enfriamiento rápido ayuda a que no se formen fases altamente frágiles que reduzcan sus propiedades mecánicas. Finalmente, conjuntamente a la fabricación de las piezas se sacaron probetas para el ensayo de tracción y se obtuvo resultados para las probetas ASTM utilizadas los valores de 70.42 kN en la fuerza de fluencia, 538.41MPa en el esfuerzo de fluencia y porcentaje de elongación de 36.51 %; En la prueba de impacto utilizando el ensayo de Charpy un valor de 122 J de energía absorbida y la velocidad de corrosión de 1.48 mg/dm².dia, estos resultados nos ayudará para garantizar la calidad de la fabricación de piezas en acero inoxidable super dúplex.

Palabras claves -- dúplex, metalografía, calidad, proceso, composición, normas, ASTM.

Abstract

The present work aims to study the manufacture of cast parts in super duplex stainless steel according to ASTM A 890 grade 5A in an induction furnace. Among the parts to be manufactured we have pipes, impellers and other pump accessories used in the Peruvian industry. This steel has some advantages over austenitic stainless steels, this type of steel has better mechanical strength and great resistance to corrosion. Having as its main objective the manufacture of this type of stainless steel that meets international quality standards that satisfy the Peruvian market.

First, information from international standards was collected to determine procedural parameters. quality control and properties in the manufacture of super duplex stainless steel. Secondly, an experimental model is applied based on the manufacture of molten stainless steels in induction furnaces, where the composition and heat treatment temperature are within the range of the ASTM A 890 standard. In addition, the heat treatment parameter was important because this provided a dissolution of carbides and rapid cooling helps prevent highly fragile phases from forming that reduce their mechanical properties. Finally, together with the manufacture of the pieces, specimens were taken for the tensile test and results were obtained for the ASTM specimens used, values of 70.42 kN in the yield force, 538.41 MPa in the yield stress and elongation percentage of 36.51 %; In the impact test using the Charpy test, a value of 122 J of absorbed energy and a corrosion rate of 1.48 mg/dm².day, these results will help us to guarantee the quality of the manufacturing of parts in super duplex stainless steel.

Keywords -- duplex, metallography, quality, process, composition, standards, ASTM.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xiii
Capitulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Antecedentes Referenciales	1
1.2 Planteamiento de la Realidad Problemática	2
1.3 Objetivo del estudio	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivo específicos	4
1.4 Hipótesis	4
1.4.1 Hipótesis general	4
Capitulo II. Marcos teórico y conceptual	5
2.1 Marco Teórico	5
2.1.1 Diseño de materiales	5
2.1.2 Evolución del acero inoxidable super dúplex	5
2.1.3 Clasificación de acero inoxidable super dúplex	6
2.1.4 Descripción del acero inoxidable super dúplex ASTM A890 grado 5 A	7
2.1.5 Diseño de aleación de acero inoxidable dúplex	7
2.1.6 Análisis Metalográfico	7
2.2 Marco conceptual	8
2.2.1 Función de los elementos de aleación en el acero inoxidable super dúplex	8
2.2.2 Metalurgia de los Aceros Inoxidables Super Dúplex	11
2.2.3 Fase primarias y secundarias en la microestructura	12
2.2.4 Efecto del tratamiento térmico del acero inoxidable super dúplex	16

2.2.5	Diagrama de enfriamiento continuo	17
2.2.6	Propiedades mecánicas del acero inoxidable super dúplex.....	18
2.2.7	Corrosión.....	20
2.2.8	Análisis químico de espectrómetro	25
2.2.9	Proceso de soldadura del acero inoxidable super dúplex	25
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación.....		27
3.1	Proceso de Fabricación:.....	27
3.1.1	Diseño y planos:.....	27
3.1.2	Modeleria	28
3.1.3	Fabricación de moldes y pintado	29
3.1.4	Fusión y vaciado	31
3.1.5	Tratamiento térmico.....	37
3.1.6	Acabado final.....	39
3.1.7	Ensayos no destructivos.....	40
3.1.8	Control de dureza.....	47
3.1.9	Evaluación de propiedades mecánicas.....	47
3.1.10	Evaluación metalográfica.....	48
3.1.11	Evaluación de la prueba de corrosión.....	50
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados		51
4.1.	Proceso de fundición.....	51
4.2	Proceso de tratamiento térmico:.....	52
4.3	Ensayos	54
4.3.1	Ensayo de tracción	54
4.3.2	Ensayo de Charpy.....	55
4.3.3	Ensayo de Dureza.....	55
4.4	Microscopia Óptica.....	56
4.5	Microscopia Electrónica de Barrido	58

4.6 Pruebas de corrosión	61
4.6.1 Calculo de velocidad de corrosión y pérdida de masa	61
4.6.2 Calculo del número equivalente de resistencia a las picaduras (PREN).....	62
Conclusiones	63
Recomendaciones	65

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Composición química de la bomba original	3
Tabla 2: Composición química de las materias primas	34
Tabla 3: Balance de carga acero inoxidable super dúplex	35
Tabla 4: Grados de tolerancia dimensional lineal para fundición (DCTG)	44
Tabla 5: Tolerancias de rectitud para fundición.....	45
Tabla 6: Tolerancias de planitud para fundición	45
Tabla 7: Tolerancia de redondez, paralelismo, perpendicularidad y simetría para fundición (mm)	46
Tabla 8: Tolerancia de coaxialidad de fundición (mm)	46
Tabla 9: Composición química del acero obtenido en la fundición	51
Tabla 10: Resultados del Ensayo de Tracción	54
Tabla 11: Valores de Dureza del acero inoxidable super dúplex.....	56
Tabla 12: Porcentajes de composición, valor de valencias peso atómico	62

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Metalografía de la bomba original	3
Figura 2: Cambio a nivel estructural de acero inoxidable	9
Figura 3: Diagrama de fases ternario Fe-Cr-Ni	12
Figura 4: Diagrama de precipitación isotérmica del acero inoxidable super dúplex.....	13
Figura 5: Diagrama de enfriamiento continuo a 1080 °C.....	18
Figura 6: Curvas de Resistencia de Tracción.....	20
Figura 7: Las curvas de isocorrosión de 0,1 mm/ año del ácido sulfúrico.....	22
Figura 8: Las curvas de isocorrosión de 0,1 mm/ año del ácido clorhídrico.....	22
Figura 9: Caja de bomba e impulsor dibujado en el programa inventor.....	27
Figura 10: Plano realizado en AutoCAD 2019.....	28
Figura 11: Modelo de impulsor de bomba.....	29
Figura 12: Caja de alma del impulsor.....	29
Figura 13: Proceso de moldeo de piezas de acero inoxidable super dúplex	30
Figura 14: Alma y molde del impulsor de bomba Ensival	30
Figura 15: Molde tapado de impulsor para su posterior vaciado	31
Figura 16: Equipos usados para el control de la fusión.....	32
Figura 17: Cromo metálico y ferro cromo nitrogenado	32
Figura 18: Silicio metálico y ferro molibdeno.....	33
Figura 19: Níquel y manganeso electrolíticos	33
Figura 20: Medición de la temperatura de sangrado y desoxidación del metal	36
Figura 21 Hornero vertiendo el metal liquido sobre el molde.....	37
Figura 22: Piezas de acero inoxidable calentadas a 1120°C.....	38
Figura 23: Curva de tratamiento térmico de solubilización usada en la fabricación de acero inoxidable super dúplex	38
Figura 24: Pieza de acero inoxidable super dúplex después de tratamiento térmico	39

Figura 25: Mecanizado de una pieza en acero inoxidable super dúplex	40
Figura 26: Impulsor en acero inoxidable super dúplex	41
Figura 27: Limpieza de superficie del impulsor	42
Figura 28: Impulsor con líquidos penetrante	42
Figura 29: Impulsor con el revelador	43
Figura 30: Microscopio óptico	48
Figura 31: Microscopio electrónico de barrido.....	49
Figura 32: Microestructura sin tratamiento térmico de acero inoxidable super dúplex.....	52
Figura 33: Microestructura de la Solubilización a 1120 ° C del acero inoxidable super dúplex	53
Figura 34 Microestructura de la Solubilización a 1120 ° C del acero inoxidable super dúplex	53
Figura 35: Grafica de los Ensayos de tracción de probetas	54
Figura 36: Resultados de la Ensayo Charpy	55
Figura 37: Metalografía Sin tratamiento térmico del acero inoxidable super dúplex	56
Figura 38: Solubilización a 1120 ° del acero inoxidable super dúplex	57
Figura 39: Análisis de imagen metalográfica en as-cast (sin tratamiento térmico)	57
Figura 40: Análisis de imagen metalográfica con tratamiento térmico	58
Figura 41: Imagen SEM del acero inoxidable sin tratamiento.....	58
Figura 42: Análisis EDS de los 5 puntos	59
Figura 43: Imagen SEM acero inoxidable con tratamiento térmico.....	60
Figura 44: Análisis EDS de los 2 puntos	60
Figura 45: Grafica de Tafel	61

Introducción

El acero inoxidable super dúplex tiene principalmente dos fases: ferrita y austenita, estas fases están muy bien distribuidas en toda la estructura metálica. Estas fases están presentes teóricamente en la proporción de 50% y 50%, pero estas pueden variar por su composición química. Esta aleación tiene distintas aplicaciones, actualmente, no existe una evaluación del desempeño de este tipo de acero inoxidable dúplex fundido en el Perú.

La relación de resistencia a la corrosión y la fabricación, de este tipo de acero es importante para el desarrollo de la industria peruana. Cuando se produce se tiene que evitar las fases Inter metálicas que son perjudiciales con el desempeño en el momento de entrar en operación. Estas tienen un efecto negativo en las propiedades mecánicas y de corrosión del acero inoxidable super dúplex. La presente tesis se enfoca en la innovación en fabricación del acero inoxidable super dúplex ASTM A890 grado 5A con estándares de calidad aplicado en partes de bombas utilizadas en la industria peruana, para la validación de la fabricación se siguió la especificación de varias normas internacionales ASTM (Asociación Americana de Ensayos de Materiales) que garantizan los procedimientos y la calidad de fabricación del producto, estas se mencionan a continuación:

a) La composición química y la temperatura de tratamiento térmico que se usó en el proceso de fabricación fueron obtenidas de la norma ASTM A 890.

b) La norma ASTM A923, utilizada para detectar fases Inter metálicas, tiene tres métodos de prueba A, B y C, estos se pueden aplicar a aceros inoxidables dúplex fundidos para garantizar su calidad en el uso. En el presente trabajo se usó el Método B que es la "Prueba de impacto Charpy para la clasificación de aceros inoxidables dúplex", este método ayudo a comparar e identificar la presencia de fases intermetálicas. Entre los parámetros a considerar en la prueba de impacto de Charpy es de tener una temperatura de prueba de -45°C .

c) Cuando se fundió las piezas en acero inoxidable super dúplex a la par se fundió probetas para realizar ensayos de tracción bajo la norma ASTM A 370, donde los valores obtenidos están dentro del rango permisible de la norma ASTM A 890.

d) La medición de la dureza se realizó en la escala Brinell, con el indentador Brinell modelo CPIT de la marca Newage, esta medición se rige bajo la norma ASTM E10 “Método de prueba estándar para la dureza Brinell de materiales metálicos”.

e) La caracterización microestructural se realizó mediante microscopio óptico y microscopio electrónico de barrido; las normas usadas son las ASTM E 3 “Guía estándar para la preparación de muestras metalográficas”, para microscopia óptica y la ASTM E 1508 “Guía estándar para análisis cuantitativo mediante espectroscopia de energía dispersiva” para microscopia electrónica de barrido.

Además, el reactivo usado para la caracterización metalográfica es el Beraha's que está bajo la norma ASTM E407 “Práctica estándar para micro grabado de metales y aleaciones”.

f) Las pruebas de corrosión e interpretación de resultados se basaron bajo norma ASTM G 102 “Práctica estándar para el cálculo de tasas de corrosión e información relacionada a partir de mediciones electroquímicas”, el cual se analizó la pérdida de masa por proceso de corrosión electroquímico.

g) Finalmente para la aprobación del producto final se realiza ensayos no destructivos como examen visual e inspección por líquidos penetrantes, estas pruebas son evaluadas bajo los criterios de aceptación de las siguientes normas ASTM A 802 “Práctica estándar para piezas fundidas de acero, normas de aceptación de superficies, examen visual” y ASTM E 165 “Práctica estándar para pruebas de líquidos penetrantes para la industria general”, para cada tipo de prueba respectivamente.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Antecedentes Referenciales

Dionicio R. y Tobar J. (2018), estudió el proceso de fabricación de los aceros en el cual se da pautas para la fabricación del acero inoxidable; en primer lugar, la carga del horno debe de tener componente con bajo contenido de carbono, debido a que estos no pueden ser eliminados fácilmente, en segundo lugar, los utensilios usados para limpieza (escoriado) del material fundido debe de tener bajo carbono. En tercer lugar, se recomienda que el horno libre de contaminantes perjudiciales para la fundición, por tal motivo sería ideal que la colada sea al inicio de semana después de haber sido reparado el horno. Finalmente, cuando esté listo el material se sacará muestras para análisis químico y para confirmar la presencia de rechupe, luego de recibir los resultados se realiza el balance necesario y esperar para su posterior fundición.

Bejarano, J. y Núñez, R. (2019), mencionaron las diferentes propiedades del acero inoxidable super dúplex que se necesita actualmente para la satisfacción de las necesidades de las empresas, es que este tipo de acero tiene dos fases, una ferrítica y otra austenítica. Además de que tienen buenas propiedades tanto mecánicas y químicas que son obtenidas por su composición y balance de fases. Dichas propiedades comparados con el acero inoxidable austenítico de la serie 300, tienen dos veces el límite de fluencia y excelente resistencia a la corrosión por picaduras, estas propiedades hacen que esta aleación tenga un enorme potencial para la fabricación de bombas.

Guerra, P. (1999), explicó si se modifica los elementos de cromo, níquel, molibdeno y nitrógeno en la composición química de los aceros inoxidables dúplex, sus propiedades cambian susceptiblemente, por un lado, el molibdeno y el nitrógeno hace que obtenga mayor resistencia a la corrosión por picaduras y a la corrosión bajo tensión. Por otro lado, se sabe que el níquel estabiliza el equilibrio entre ferrita y austenita.

Esta aleación es más sensible a la formación de carburos en la fase austenítica, en un rango de 700 a 1000 ° C se forma la fase sigma, además en el rango de 325 a 520 ° C es muy quebradizo y presenta buena soldabilidad con las técnicas SMAW, TIG, PAW y SAW.

1.2 Planteamiento de la Realidad Problemática

Actualmente las piezas fundidas en aceros inoxidable dúplex y super dúplex se importan, no se fabrican en Perú, porque el empresario no confía en la industria peruana para la fabricación de estos materiales cuyas aplicaciones son sumamente especiales ya que trabajan con soluciones químicas altamente corrosivas. El desarrollo de aceros inoxidables super dúplex en el Perú, traería unas múltiples ventajas, ahorro en costos financieros, stock de almacenes, menor tiempo de reposición de stocks, menor costo de la pieza fundida, etc.

El caso de NEXA RESOURCES, usa bombas marca ENSIVAL todas fabricadas en acero dúplex y super dúplex, a través de MEFICO SAC, se hizo la propuesta para fabricar una bomba modelo CDN 150-32 en **acero inoxidable super dúplex**, cuyo rendimiento sea igual o mejor al importado. La bomba modelo CDN 150-32 fabricado en acero inoxidable dúplex, tiene la siguiente composición química (Tabla 1) y microestructura (Figura 1), y la vida útil de esta bomba es de 1.5 años, bajo las condiciones de trabajo de bombeo en ácido sulfúrico diluido, cuya concentración es de 180g/L, y 50°C de temperatura máxima.

Tabla 1

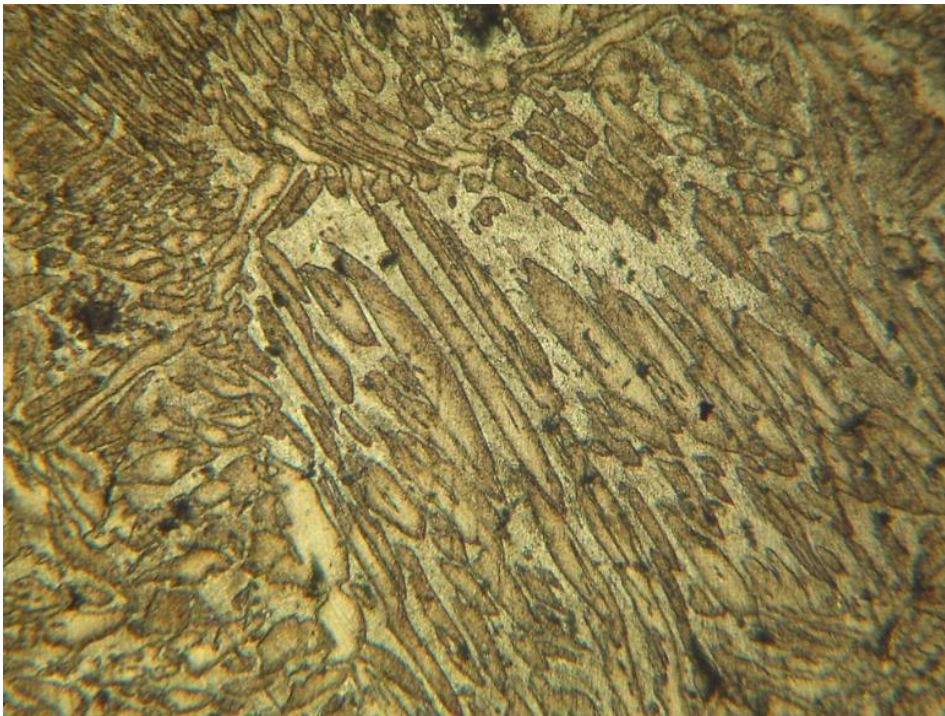
Composición química de la bomba original

Elemento	Límite Inferior	Limite Superior
C	0.04	máx.
Mn	1.00	máx.
Si	1.00	máx.
P	0.04	máx.
S	0.04	máx.
Cr	24.50	26.50
Ni	4.75	6.00
Mo	1.75	2.25
Cu	2.75	3.25

Nota: Rango de la composición de la bomba original. fuente: laboratorio de calidad de la empresa MEFICO.

Figura 1

Metalografía de la bomba original



Nota. Acero inoxidable dúplex, Estructura austenítica- ferrítica. Aumento: 100x. fuente: laboratorio de calidad de la empresa MEFICO.

1.3 Objetivo del estudio

1.3.1 Objetivo general

Innovar el proceso de fabricación del acero inoxidable super dúplex ASTM A 890 grado 5 A.

1.3.2 *Objetivo específicos*

- Fabricar el acero inoxidable super dúplex ASTM A 890 grado 5 A en un horno de inducción en la empresa MEFICO SAC.
- Identificar los parámetros de fabricación del acero inoxidable dúplex en la empresa metalurgia del Fierro y el cobre.
- Definir la microestructura del acero inoxidable super dúplex.
- Determinar las propiedades mecánicas del acero inoxidable super dúplex.
- Determinar las fases secundarias y primarias mediante microscopio electrónico y microscopio óptico.
- Calcular la velocidad de corrosión del acero inoxidable super dúplex con un potenciómetro.

1.4 Hipótesis

1.4.1 *Hipótesis general*

La influencia de los parámetros de composición química y tratamiento térmico en la fabricación del acero inoxidable dúplex según la norma ASTM A 890 nos permitirá obtener piezas con gran resistencia a la corrosión y propiedades mecánicas.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco Teórico

2.1.1 *Diseño de materiales*

En el diseño de todos los materiales se requiere considerar los siguientes aspectos:

En primer lugar, la selección de elementos químicos, debido a que toda selección de cada elemento se realiza en función del número atómico de cada elemento, cualquier propiedad del elemento químico o material en las cuales se encuentra depende de su número de protones. En segundo lugar, la selección de los enlaces moleculares se realiza en función al tipo de enlace molecular primario o secundario, cualquier propiedad del material depende del tipo de enlace molecular. Finalmente, la selección del tipo de red cristalina, esta depende del tipo de red cristalina simple, centrado en el cuerpo, centrado en la base y centrado en las caras, cualquier propiedad del material depende del tipo de red cristalina. La Metalurgia Física de este tipo de acero inoxidable fundido, define todas las características microestructurales y propiedades mecánicas.

2.1.2 *Evolución del acero inoxidable super dúplex*

En el año de 1930 se fabricaron los primeros aceros inoxidables dúplex laminados, los cuales se utilizaron en la industria del papel al bisulfito, con el fin de disminuir la corrosión intergranular en los aceros inoxidable. En Finlandia en ese mismo año se producían las primeras piezas fundidas y 6 años más tarde en Francia se concedía una patente llamada Uranus 50. Después de la segunda Guerra mundial, el material AISI 329 se utilizó para fabricar tubos que intercambiaran calor con ácido nítrico. También, el 3RE60 se fabricó para que resista la corrosión bajo tensiones en presencia de cloruros (SCC), (International Molybdeno Association, 2012).

Gunn, R. (1997) mencionó que los niveles mínimos de carbono eran altos (alrededor del 0,08 %), debido a los hornos existentes y las técnicas de refinado no alcanzaban a tener más bajos contenidos de carbón. Estos valores ocasionaron que los

aceros fueran sensibles a la precipitación de carburos en el límite de grano al tratarse térmicamente o después de soldar, estas precipitaciones de carburos provocan ataques de corrosión intergranular.

La primera generación de aceros inoxidable dúplex tiene buenos rendimientos, pero presentaban limitaciones en las uniones soldadas. La zona afectada térmicamente (ZAT) por la soldadura, presenta una tenacidad reducida, debido al exceso de ferrita, y una resistencia a la corrosión considerablemente menor que la del metal base. La invención en 1968 del proceso de afino del acero inoxidable por descarburación con argón y oxígeno (AOD) amplió el espectro de posibilidades de nuevos aceros inoxidables, la adición del nitrógeno en estos tipos de aceros permitió tenacidad en la ZAT y resistencia de la corrosión en la unión soldada. Además, incrementó la estabilidad de la austenita, como la reducción de las velocidades de formación de fases intermitentes perjudiciales. La segunda generación de aceros inoxidable dúplex son los que tienen como elemento importante al nitrógeno. Este desarrollo se realizó a finales de los años 70, estos poseen una resistencia a la corrosión por cloruros y su fácil manufactura y excelentes propiedades mecánicas (International Molybdeno Association, 2012).

2.1.3 Clasificación de acero inoxidable super dúplex

Los aceros inoxidables dúplex se dividen en la actualidad en 5 grupos (International Molybdeno Association, 2012) :

- Dúplex de baja aleación, por ejemplo, el EN 1.4362 (2304), esta aleación no se añade molibdeno.
- Dúplex estándar como EN 1.4462 (2205), es el más empleado y representa más del 80 % del uso de aceros dúplex.
- 25 % Cr dúplex, como la Aleación 255 con PREN (Número Equivalente de Resistencia al Picado) inferior a 40

- Súper dúplex (PREN 40–45), con 25–26 % de Cr, estos contienen una gran cantidad de Mo y N, al igual que la siguiente aleación de 25 % Cr, como el EN 1.4410 (2507).
- Híper dúplex, este tipo de acero inoxidable dúplex se caracteriza por ser una alta aleación con un PREN mayor de 45.

2.1.4 Descripción del acero inoxidable super dúplex ASTM A890 grado 5 A

El acero inoxidable súper dúplex, contiene 0.03%C máx., 25° % de Cromo, 4°% de Molibdeno, 7°% de Níquel y 0.25% de Nitrógeno, diseñado para aplicaciones exigentes que requieren una resistencia mecánica y una resistencia a la corrosión excepcionales, utilizado en la industria química, petroquímica y de agua de mar. Este acero inoxidable super dúplex, tiene una excelente resistencia a la corrosión por picaduras (Pitting) cuando está expuesto en medios con alto porcentaje de cloruros. (Guerra, P. 1999).

2.1.5 Diseño de aleación de acero inoxidable dúplex

La fundición de acero inoxidable super dúplex se puede fabricar de diferentes maneras, usando los métodos convencionales tipo AOD, VOD, o también usando un horno de inducción y materiales de alta pureza, Cromo metálico, níquel metálico, fierro molibdeno de bajo porcentaje de carbón, Silicio metálico, Manganeso metálico, etc. Después de la fundición, el material es sometido a un proceso de tratamiento térmico, que consiste en calentar hasta 1120°C, para disolver los carburos precipitados durante el enfriamiento de la pieza fundida (Gunn, R. 1997).

2.1.6 Análisis Metalográfico

Para la evaluación de la microestructura de acero inoxidable super dúplex requiere técnicas de ataque adecuadas para el uso del microscopio de luz óptica (OLM) y microscopio electrónico de barrido (SEM).

El microscopio óptico es una herramienta que nos ayuda a investigar la microestructura, estos sistemas de iluminación ópticos son muy básicos. Solo se usa con probetas metálicas que son opacos a la luz visible, únicamente se ve la superficie mediante

la reflexión. Cuando se observa a través del microscopio se ve los distintos contrastes de color de la imagen que se observa por las diferencias en la reflectividad en toda la microestructura analizada. Cuando se analiza más de una fase, se usa distintos tipos de reactivos que producen distintos tipos de textura de cada fase. Lo máximo en que se puede ampliar una imagen es de aproximadamente 2000 aumentos (Delgado, G. 2016).

El microscopio electrónico de barrido (SEM), usa el método EDS que determina la composición química de elementos, fases o precipitados microestructurales en materiales, en donde la muestra analizada es excitada por un haz de electrones, después un electrón de la capa de afuera de gran energía cambia de lugar con un electrón de la capa de núcleo. Este fenómeno trae como consecuencia la liberación de energía mediante rayos X que tiene un espectro característico semejante al átomo origen, esto arroja un análisis de composición en un volumen de la muestra. Los resultados se dan en picos de cada elemento que se encuentra.

Para el análisis micrográfico del acero inoxidable super dúplex se puede usar los siguientes reactivos para el ataque y revelación de la microestructura según ASTM E 407:

- Marble's (10 g CuSO_4 , 50 ml HCl, 50 ml H_2O)
- Behara's (125 ml H_2O , 25 ml HCl, 3 g NH_4HF_2 y 0.1 g $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$), muestra la fase austenítica, ferrítica y fases secundarias.

La microscopía de luz óptica no es muy sensible para identificar todas las fases secundarias del acero inoxidable super dúplex. Por tal motivo se usa la microscopía electrónica de barrido para identificar estas fases secundarias.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Función de los elementos de aleación en el acero inoxidable super dúplex

En la fabricación de acero inoxidable dúplex, se utilizan diferentes tipos de elementos de aleación que favorece y ayudan a la formación de la estructura ferrítica – austenítica, también beneficia para tenga propiedades resistentes a la corrosión, entre estos elementos se tiene:

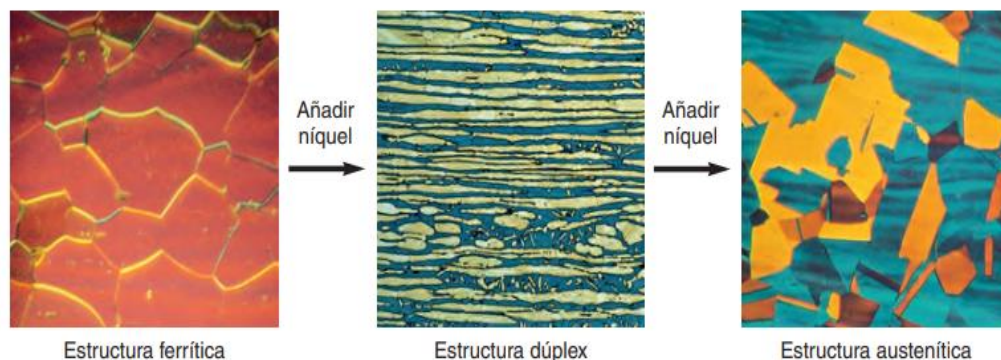
2.2.1.1 Cromo. Tiene como función principal de mejorar la resistencia a la corrosión localizada mediante la formación de una película pasiva de oxihidróxido de cromo que protege al acero contra la corrosión. Aparte de esto, el cromo también estabiliza la ferrita y forma estructura cúbica centrada en el cuerpo del hierro. Sin embargo, cuando se tenga niveles muy altos de cromo hay un aumento en la resistencia de oxidación a elevadas temperaturas, el beneficio de este aumento se ve anulado por la mayor precipitación de las fases intermetálicas que a menudo conducen a una reducción de la ductilidad, la tenacidad y la resistencia a la corrosión (Gunn, R. 1997).

2.2.1.2 Molibdeno. La adición de molibdeno tiene una influencia beneficiosa en la resistencia a la corrosión por picaduras y bajo tensión en soluciones de cloruro. Además, es un gran formador de ferrita y fases intermetálicas perjudiciales como la fase sigma, el porcentaje que se usa en acero inoxidable dúplex es alrededor de 4% (IMOA, 2012).

2.2.1.3 Níquel. Este elemento es un estabilizador de la austenita, que cambia su estructura pasando de cubica centrada en el cuerpo (ferrítica) a cubica centrada en las caras (austenítica). El contenido de níquel varía de 1.5 a 7 % en los aceros dúplex. Esta adición retrasa la formación de fases intermetálicas perjudiciales, pero no es tan eficaz como el nitrógeno. La estructura cúbica centrada en las caras es la responsable que este tenga una excelente tenacidad en comparación de los aceros inoxidables ferríticos. (Gunn, R. 1997). Ver Figura 2, cambio estructural de los aceros inoxidables.

Figura 2

Cambio a nivel estructural de acero inoxidable



Nota: variación de la microestructura al momento de añadir níquel. fuente: Directrices Prácticas para la Fabricación de los Aceros Inoxidables Dúplex (p,7), por IMOA, 2012.

Con un contenido excesivo de níquel, el nivel de austenita aumenta muy por encima de 50%, teniendo como resultado, la transformación de la ferrita en fases intermetálicas que tiene resistencia temperaturas en el rango de 650 a 950 °C. Además, que los altos contenidos de Níquel aceleran la formación de la fase alfa prima, una fase intermetálica quebradiza en la ferrita. Finalmente, el níquel tiene algún efecto directo sobre las propiedades de corrosión y controlar el equilibrio de fase.

2.2.1.4 Nitrógeno. El nitrógeno tiene varios efectos beneficiosos, en primer lugar, aumenta la resistencia a la corrosión por picaduras y bajo tensión. Esto se debe a que el nitrógeno altera a la química de la solución en grietas y segrega en la superficie, teniendo como resultados la mejora de la resistencia por corrosión. En segundo lugar, aumenta la resistencia mecánica del acero inoxidable dúplex, porque aumenta el contenido de austenita y disminuye del contenido de fases Intermetálicas como sigma.

Finalmente, el aumento del nivel de nitrógeno en realidad reduce el riesgo de formación de nitruros. Debido al aumento en el contenido de austenita y, por lo tanto, a una reducción en la distancia entre las islas de austenita. La adición de C y N fortalece tanto la ferrita como la austenita que se disuelven en los sitios intersticiales de la solución sólida. Sin embargo, como el carbono no es deseable en el acero inoxidable, se prefiere la adición del nitrógeno que suprime la disolución de la austenita y fomenta la reformación de la austenita en la Zona Afectada Térmicamente (ZAT) (Gunn, R. 1997).

2.2.1.5 Manganeso. La adicción de manganeso en el acero inoxidable aumenta la resistencia a la abrasión, al desgaste y las propiedades de tracción, sin pérdida de ductilidad. Además, aumenta la solubilidad sólida del nitrógeno, obteniendo un mayor contenido de nitrógeno sin riesgo de desprendimiento de gases. Sin embargo, la adición combinada de Mn y N en las aleaciones dúplex mejora la resistencia a la corrosión por picaduras (Gunn, R. 1997).

2.2.1.6 Silicio. El silicio es beneficioso cuando se usa en ácido nítrico concentrado, a su vez mejora la resistencia a la oxidación a altas temperaturas. Sin

embargo, se considera que el Si es formador de la fase sigma, por tal motivo se limita su adición como máximo a 1% (Gunn, R. 1997).

2.2.1.7 Carbón. El contenido de carbono en los aceros inoxidable dúplex está en el rango de 0.02 % o 0.03 %. Con el objetivo de suprimir la precipitación de carburos ricos en Cr que inician la corrosión por picaduras y el ataque intergranular en el acero (Gunn, R. 1997).

2.2.1.8 Azufre y fósforo. Los contenidos de S y P se controlan, aunque no se eliminan, pero su presencia es importante para la penetración del cordón de soldadura.

2.2.2 Metalurgia de los Aceros Inoxidables Super Dúplex

En los aceros inoxidable dúplex, se usa un diagrama ternario de hierro cromo y níquel, en el cual se ve todos los comportamientos metalúrgicos de este tipo de aceros. En la Figura 3, por un lado, se muestra en la sección con 68 % de hierro, se ve como se forma primero la fase de la ferrita (α), para luego cambiarse parcialmente en austenita, en una temperatura de 1000°C, luego al seguir descendiendo la temperatura se produce un equilibrio de ferrita y austenita. Por otro lado, se aprecia que el nitrógeno tiene un efecto que varía el límite de cada fase en el diagrama. Finalmente, a temperaturas más bajas los carburos, nitruros, fase sigma y otras fases intermetálicas están como constituyentes microestructurales.

De acuerdo con IMO A (2012) las cantidades relativas de ferrita y austenita se definen tanto con la composición química y del tratamiento térmico. Si existe algún cambio con respecto a su composición este tiene consecuencias tanto en el volumen relativo de estas fases como se muestra en la Figura 4. El equilibrio de estas fases en la microestructura puede predecirse con regresión lineal multivariable mostrado en las ecuaciones (1), (2) y (3):

$$Cr_{eq} = \%Cr + 1.73 \%Si + 0.88 \% Mo \quad (1)$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 24.55 \%C + 21.75 \% N + 0.4\% Cu \quad (2)$$

$$\%Ferrite = -2.93 + 4.01Cr_{eq} - 5.6Ni_{eq} + 0.016 T(temperatura ^\circ C) \quad (3)$$

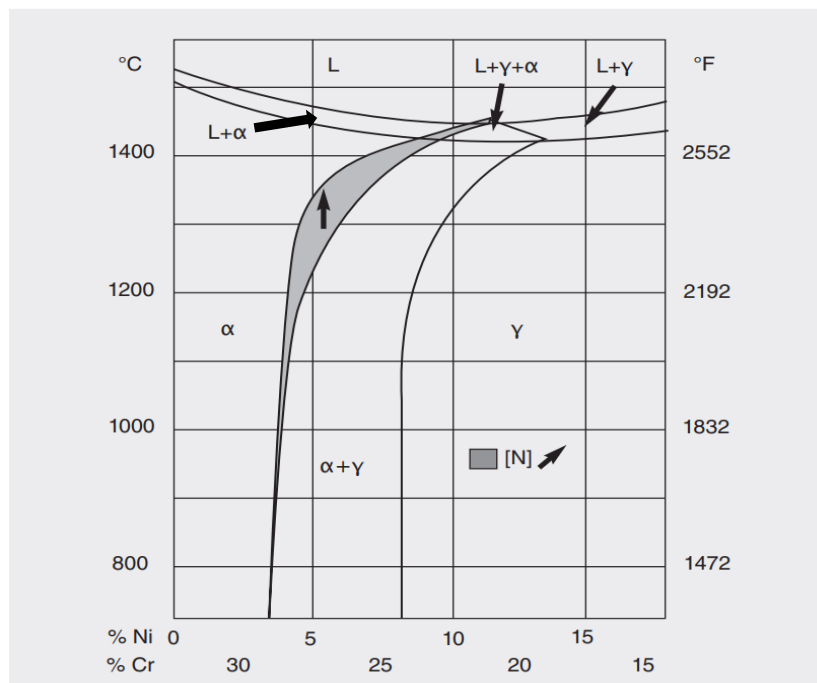
Donde:

T: es la temperatura de tratamiento en grados Celsius y las demás variables son las composiciones de los elementos en porcentaje en peso.

La velocidad con la que se solidifica ayuda a determinar la cantidad de ferrita que se transforma en austenita, quiere decir que a enfriamiento rápido se contribuye al dominio de la fase ferrítica, además, el elemento nitrógeno ayuda que se forme la austenita (IMOA ,2012)

Figura 3

Diagrama de fases ternario Fe-Cr-Ni



Nota. Influencia del Nitrógeno en el aumento de la temperatura de formación de la fase $\alpha + \gamma$ en el diagrama de fases ternario Fe-Cr-Ni con 68 % de hierro, fuente: Directrices Prácticas para la Fabricación de los Aceros Inoxidables Dúplex (p.10), por International Molybdeno Association,2012, (IMOA).

Luego de la formación de estas dos fases, al momento de seguir enfriando se forman fases perjudiciales como la sigma, alfa prima, carburos y nitruros, estas se pueden formar en tan solo minutos y en diferentes temperaturas. En los siguientes párrafos se ampliará más de estas fases secundarias (IMOA ,2012).

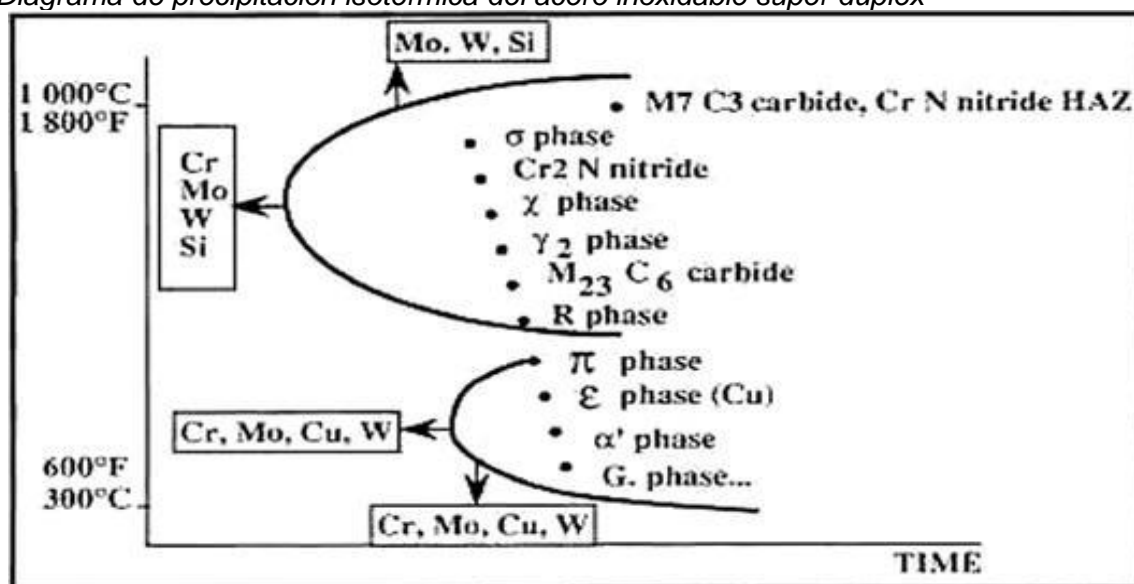
2.2.3 Fase primarias y secundarias en la microestructura

Cuando empieza la solidificación del acero inoxidable dúplex, el primer sólido que se forma es la ferrita. A medida que se enfría y baja la temperatura se va formando la

austenita. Después de la solidificación completa, la microestructura es la de islas de austenita en una matriz de ferrita. Las grandes cantidades de elementos de aleación que se agregan dan como resultado la formación de varios carburos, fases intermetálicas y secundarias que se forman en diferentes rangos de temperatura a velocidades variables (Gunn, 1997). Ver siguiente Figura 4.

Figura 4

Diagrama de precipitación isotérmica del acero inoxidable super dúplex



Nota. En el diagrama se muestra la aparición de todas las fases secundarias y su respectiva temperatura. fuente: Dúplex Stainless Steel (p.16), por Robert N Gunn, 1997, Abington Publishing.

Por otro lado, para Shamanth et al. (2019) las fases secundarias que se encuentra en la fundición de acero inoxidable dúplex son las siguientes:

2.2.3.1 Fase sigma (σ). La fase Sigma (σ) es un precipitado duro y frágil, rico en cromo y molibdeno que se forma entre 650 y 1000 °C, se asocia a menudo con una reducción de la tenacidad al impacto y la resistencia a la corrosión. La concentración de Mo y Cr en la ferrita es mayor que en la austenita, por tal motivo la precipitación en la fase σ , generalmente ocurre en la fase de ferrita. La reducción del contenido de Mo es mucho más notable en comparación con el de Cr, lo que indica que el Mo es el principal elemento que controla la precipitación de la fase σ . La formación de la fase σ es rápida y se requiere una velocidad de enfriamiento muy alta para evitar su formación durante el enfriamiento desde la temperatura de disolución.

2.2.3.2 Fase chi (χ). El enriquecimiento de la ferrita con elementos formadores intermetálicos durante la exposición térmica a largo plazo a temperaturas alrededor de 700°C, favorece la precipitación de la fase Chi (χ). A menudo se nuclea en la interfaz α/γ y crece en la matriz α . Es difícil estudiar su influencia sobre la corrosión y la tenacidad ya que a menudo coexiste con la fase σ . El aumento del tiempo de envejecimiento provoca un enriquecimiento de Mo y un agotamiento de Fe en la fase χ . Durante el envejecimiento isotérmico, la fase χ siempre precipita antes que la fase σ , pero durante el enfriamiento continuo, la fase χ aparece solo a velocidades de enfriamiento bajas.

2.2.3.3 Austenita secundaria (γ_2). El mecanismo y la velocidad de formación de la austenita secundaria (γ_2) pueden variar según la temperatura. En el rango de temperatura de 700 a 900 °C, el mecanismo típico es la reacción eutectoide, que se ve facilitada por la rápida difusión a lo largo de los límites α/γ que dan lugar a la fase σ y γ_2 en los granos de ferrita anteriores. Esto también reduce el contenido de Cr y Mo en la ferrita. Cuando el Cr_2N precipita de manera cooperativa, se ha encontrado que γ_2 es pobre en Cr, lo que lo hace altamente susceptible a la corrosión por picaduras. A temperaturas superiores a 650 °C, las velocidades de difusión son mayores, en la formación de γ_2 . Por debajo de 650 °C, la ferrita se transforma en γ_2 mediante un mecanismo bastante similar al de la formación de martensita, la fase γ_2 formada de esta manera tiene una composición similar a la red ferrítica, lo que indica que la transformación fue sin difusión.

2.2.3.4 Fase R. El tratamiento isotérmico de los aceros inoxidables dúplex entre 550 y 650 °C da como resultado una distribución uniforme y muy fina de la fase R en los granos α . La fase R es un intermetálico rico en Mo que tiene una estructura cristalina trigonal. Su formación reduce la tenacidad y la temperatura crítica de picado en DSS. Los precipitados de la fase R pueden ser de naturaleza intergranular o intragranular; los primeros quizás sean más perjudiciales con respecto a la corrosión por picaduras, ya que pueden contener hasta un 40% de Mo. Con el aumento en el tiempo de envejecimiento, la

fase R se transforma en fase σ debido a la difusión de Mo desde la fase R a la fase σ , lo que eventualmente resulta en la disminución de la fracción de volumen de la fase R.

2.2.3.5 Nitruros de cromo (Cr_2N). La solubilidad del nitrógeno en ferrita a unos 1000 °C es alta, pero disminuye al enfriarse y la ferrita se sobresatura en nitrógeno, lo que lleva a la precipitación intergranular de Cr_2N en forma de aguja. El Tratamiento térmico isotérmico en el rango de temperatura de 700 a 900 °C generalmente da como resultado la precipitación de Cr_2N en los límites de grano α/α o en los límites de fase α/γ . La fase Cr_2N hexagonal formado bajo estas condiciones tiene una influencia negativa en la resistencia a la corrosión por picaduras. En el ZAT después de soldar es predominante este nitruro. Los precipitados de Cr_2N muestran una morfología similar a una película o una plaqueta diminuta.

2.2.3.6 Carburos (M_{23}C_6 y M_7C_3). El M_7C_3 se forma en los límites de grano α/γ en el rango de temperatura de 950 a 1050 °C, pero puede evitarse mediante métodos de extinción normales, ya que su formación tarda al menos 10 min. El M_{23}C_6 precipita rápidamente entre 650 y 950°C, predominantemente en los límites α/γ donde la ferrita rica en Cr se cruza con la austenita rica en C. Se han registrado varias morfologías de precipitados, incluidas formas cúbicas, aciculares y celulares; teniendo cada uno una zona empobrecida de Cr asociada en su vecindad. Dado que los grados dúplex modernos contienen menos de 0,02 % C, rara vez se ven carburos de cualquier forma.

2.2.3.7 Alpha Prime (α'). Alpha Prime (α') es un precipitado rico en cromo que se forma en el rango de temperatura de 280 a 525 °C. La causa principal de la formación de α' es la brecha de miscibilidad en el sistema Fe-Cr, por lo que la ferrita sufre una descomposición en forma de espinas como ferrita α rica en Fe y α' rica en Cr. Se forma dentro de la brecha de miscibilidad, pero justo fuera de la espinada. El precipitado α' tiene una estructura cristalina centrada en el cuerpo y es la causa principal del endurecimiento y la fragilización a 475°C en los aceros inoxidables ferríticos.

2.2.3.8 Fases G y η . La fase G se desarrolla en las interfaces α/α' entre 300 y 400 °C después de varias horas de exposición, debido al enriquecimiento de Ni y Si en estos lugares. La fase η es un precipitado fuertemente fallado con una morfología similar a una aguja que se forma debido al tratamiento térmico en el rango de temperatura de 550 a 650°C. Tiene una estructura cristalina ortorrómbica.

2.2.4 Efecto del tratamiento térmico del acero inoxidable super dúplex

Cuando se realiza el tratamiento térmico de los aceros inoxidables super dúplex existe la disolución de las fases sigma, chi, etc. No existen cambios en su estructura que está compuesta por ferrita y austenita. Cuando se tiene los diagramas de transformación de tiempo temperatura (TTT), los tratamientos térmicos son realizados a una temperatura específica, seguido de un enfriamiento rápido, frecuentemente se usan para representar la susceptibilidad de los diferentes grados a la fragilización. Estos son de naturaleza conservadora y no implican que las propiedades mecánicas o la resistencia a la corrosión se modifiquen tan pronto como se alcancen los límites indicados, aunque se puede notar un efecto en las propiedades antes de que se alcancen los límites. Gunn (1997), realizó un estudio de los cambios que ocurre desde los 1050°C a 300 °. Estos cambios se mencionan a continuación:

2.2.4.1 Temperaturas superiores a 1050°C. Los aceros inoxidables dúplex se solidifican completamente en el campo de ferrita para grados estándar y velocidades de enfriamiento normales. En este paso, hay una transformación del estado sólido a austenita, esta transformación también es reversible naturalmente cuando hay un aumento de temperatura de 1050 a 1300 °C, porque conduce a un aumento en el contenido de ferrita. Así mismo, a medida que exista un incremento en la temperatura, hay una reducción en la partición de elementos de sustitución entre fases, y la ferrita se enriquece en elementos intersticiales como el carbono y el nitrógeno.

La influencia de la composición química es notable en la hora de formar el contenido de ferrita a diferentes temperaturas. Cuando se realiza la adición de nitrógeno en

concentraciones que van del 0.25 a 0.40 %, se tiene como resultado una gran estabilidad en la estructura de estas dos fases. A 1250 ° C, las fracciones de contenido tanto de ferrita como austenita en estas aleaciones siguen siendo de equitativos. Por otro lado, cuando se tiene menos del 0.2 % de N, el contenido de ferrita varía entre 80 a 85 %.

2.2.4.2 Temperaturas de 600 a 1050 ° C. Los aceros inoxidable super dúplex muestran una gran precipitación intermetálica, debido a sus altos porcentajes de Cr y Mo. Sin embargo, se debe resaltar que la cinética de precipitación en estos grados de alta aleación es, en el peor de los casos, equivalente a aceros inoxidable superausteníticos o superferríticos. Para realizar la fabricación de estos aceros inoxidable, se toman precauciones en el tratamiento térmico, incluida una rápida extracción del horno seguida de un rápido enfriamiento con agua, las aleaciones super dúplex se pueden utilizar satisfactoriamente en aplicaciones industriales. Sin embargo, se requiere un cuidado especial para espesores de más de 60 mm durante su producción, en el tratamiento térmico, se debe acelerar el enfriamiento, en pozos de agua con un sistema de enfriamiento, esto es para que no presenten fases intermetálicas perjudiciales.

2.2.4.3 Temperaturas de 300 a 600 ° C. Las aleaciones de inoxidable super dúplex muestran rangos de temperatura más amplios para el endurecimiento y los tiempos de incubación más cortos. Esto es gracias a los contenidos más altos de Cr y Mo.

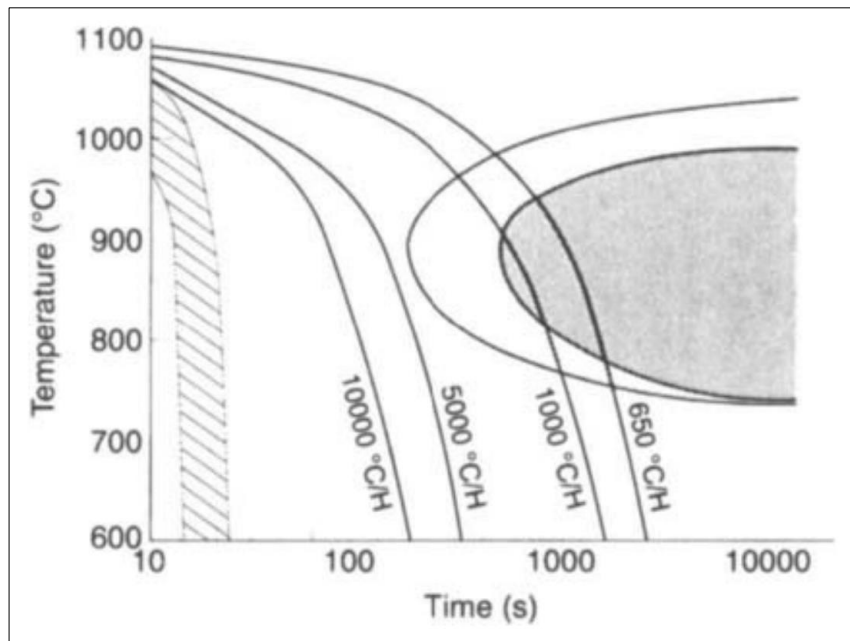
2.2.5 Diagrama de enfriamiento continuo

Gunn (1997) mencionó que cuando se va a realizar el tratamiento térmico de los aceros inoxidable super dúplex, es importante recordar que, a temperaturas cercanas al solvus, la nucleación de los precipitados es pausada y su crecimiento es veloz, mientras que, a temperaturas más bajas, cerca de la "nariz" de la curva de transformación, ocurre lo contrario. Por un lado, es complicado evitar las transformaciones de fase, como la fase sigma, durante el recalentamiento de productos de sección gruesa (por ejemplo, lingotes, piezas fundidas, placa gruesa, etc.), por esta razón se debe de realizar tratamiento de solución a una temperatura suficientemente alta para que de nuevo se vuelva a disolver

cualquiera de esas fases. Por otro lado, durante el enfriamiento, la pausada tasa de nucleación a alta temperatura y la lenta tasa de crecimiento a temperaturas más bajas hacen que sea relativamente sencillo evitar la formación de la fase sigma, incluso en el caso del enfriamiento por aire de ciertas fundiciones, en la Figura 5, se muestra un diagrama de transformación de enfriamiento continuo (CCT).

Figura 5

Diagrama de enfriamiento continuo a 1080 °C



Nota. El área punteada denota velocidades de enfriamiento típicas, mientras que las dos áreas sombreadas representan diferentes sensibilidades a la formación de fases intermetálica en aleaciones super dúplex. fuente: Dúplex Stainless Steel (p.35), por Robert N Gunn, 1997, Abington Publishing.

Sin embargo, se recomienda un veloz enfriamiento para temperaturas de tratamiento mayores, debido al aumento del riesgo de precipitación de nitruros. Finalmente, cuando se realiza la soldadura de este tipo de piezas, el enfriamiento es más rápido que no hace precipitar ninguna fase intermetálica.

2.2.6 Propiedades mecánicas del acero inoxidable super dúplex

Cuando se fabrica este tipo de aceros inoxidables se debe de tener niveles bajos de carbón para poder disminuir o desaparecer los problemas de rotura por desgarro en caliente. También para mejorar las propiedades mecánicas tanto como el esfuerzo máximo, elongación, etc.; la adición de nitrógeno es elemental para este tipo de acero,

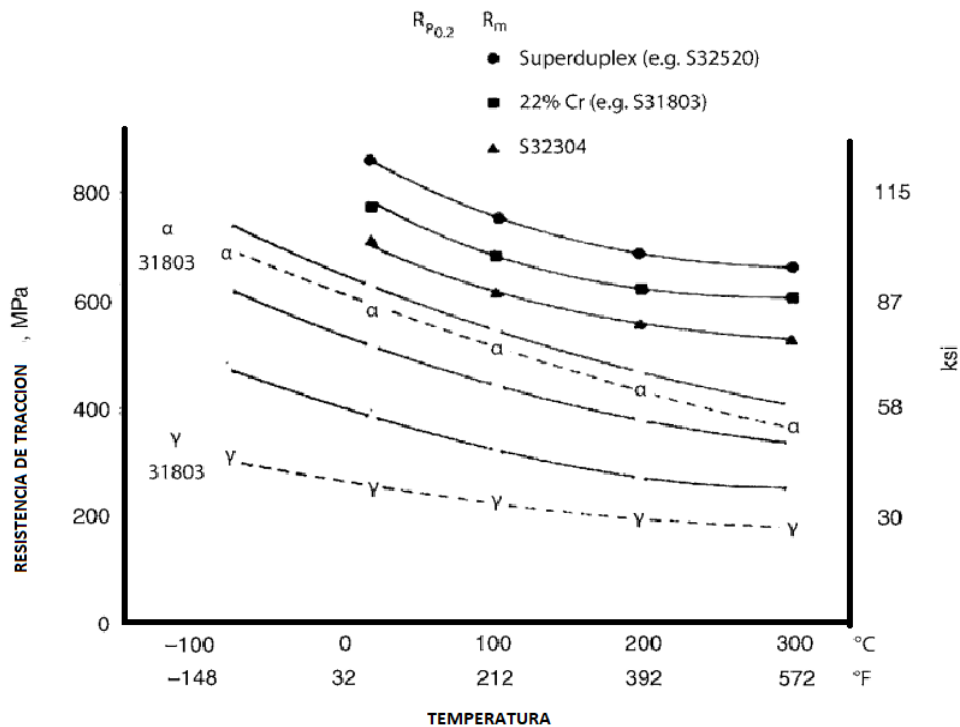
además proporciona grandes efectos con respecto a la corrosión localizada por erosión (Gradwell et al., 1981).

Las aleaciones de aceros inoxidable super dúplex presentan una combinación de características de las aleaciones austeníticas y ferríticas. Estas son una alta resistencia de tenacidad y ductilidad. Además, su alto límite elástico es dos veces más que los aceros inoxidable austeníticos. Estas propiedades son debido al endurecimiento de la solución solida por níquel cromo, molibdeno y manganeso; y también al endurecimiento en la solución intersticial por el carbono y nitrógeno. (McGuire, M. 2008).

El dominio en la aleación de acero inoxidable super dúplex del nitrógeno es interesante porque a niveles debajo del 0,1 %, la austenita es la fase más débil, pero el nitrógeno adicional fortalece la austenita de modo que por encima del 0,2 % de nitrógeno, la austenita se convierte en la fase más fuerte. Además, la fase de ferrita controla las propiedades mecánicas, la dependencia de estas propiedades con la temperatura es significativa ya que el flujo en las estructuras cúbicas centradas en el cuerpo (BCC) se activa térmicamente. La Figura 6, se muestra una la variación de la resistencia a la tracción a diferentes temperaturas de los aceros inoxidables austeníticos, ferríticos y dúplex. En esta imagen se ve que existe una disminución de la propiedad de resistencia de tracción cuando supera a los 300 °C, porque tienen una transición de dúctil a frágil cuando supera esa temperatura, tampoco se adaptan bien al uso criogénico.

Figura 6

Curvas de Resistencia de Tracción



Nota. Curvas de resistencias de tracción de aceros inoxidables austeníticos, ferríticos y dúplex a diferentes temperaturas. fuente: Stainless Steel for design engineers I (p.98), por McGuire M, 2008.

2.2.6.1 Tenacidad. La tenacidad es una cualidad importante en una aleación dúplex para reemplazar las aleaciones austeníticas extremadamente tenaces. Está es de temperatura intermedia a baja en comparación de las aleaciones ferríticas y austeníticas. La tenacidad mejora con la disminución del tamaño del grano y se deteriora con el trabajo en frío. La disminución de la tenacidad se da gracias a que hay precipitación de fases intermetálicas, como α' y σ (Grandwell et al., 1981).

2.2.7 Corrosión

Las propiedades de corrosión de los aceros inoxidables dúplex están determinadas principalmente por su capacidad para pasivarse y permanecer pasivado en el entorno operativo. Sin embargo, existen diferencias fundamentales en el diseño de aleaciones de grado dúplex y austenítico, lo que lleva a cambios significativos en su comportamiento frente a la corrosión, especialmente en entornos donde se produce una corrosión extensa. Por otro lado, las aleaciones austeníticas y dúplex con PREN equivalente suelen exhibir

temperaturas críticas similares de corrosión por picaduras y grietas en ambientes clorados.

Ver ecuación (4):

$$PREN = \%Cr + 3.3 \%Mo + 16 \%N \quad (4)$$

Dónde: PREN es número equivalente de resistencia a las picaduras.

Los elementos de aleación más importantes involucrados en las propiedades de corrosión localizada de los aceros inoxidable dúplex son Cr, Mo y N, mientras que el Ni actúa principalmente para estabilizar la fase austenítica. Sin embargo, estos elementos no se distribuyen uniformemente entre las dos fases, con Cr y Mo enriquecidos en ferrita y Ni y N en austeníticos. En particular, el nitrógeno está presente casi en su totalidad en aceros austeníticos. En los primeros grados, la fase austenítica tendía a sufrir un ataque preferencial, pero en los aceros dúplex modernos, con un mayor contenido general de nitrógeno, la resistencia a la corrosión de las dos fases se puede equilibrar (Gunn, 1997).

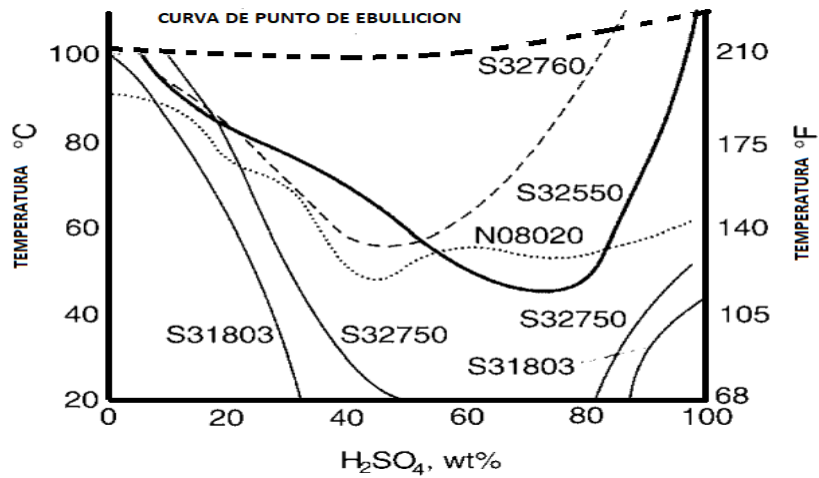
2.2.7.1 Comportamiento a la corrosión del acero inoxidable super dúplex.

La corrosión los aceros inoxidable super dúplex ofrecen ventajas sobre los aceros inoxidable austeníticos en diferentes medios, como en el ácido sulfúrico, el ácido clorhídrico, el hidróxido de sodio, el ácido fosfórico y los ácidos orgánicos. Este rendimiento se alarga hasta en casos de alta agresividad de estos medios más su contaminación. McGuire M (2008), realiza estudios de corrosión de acero inoxidable dúplex en varios medios, por ejemplo:

2.2.7.1.1 Ácido sulfúrico. En la Figura 7 muestra grados dúplex adicionales con mayor aleación. En casos reales, como en la desulfuración de gases de combustión, el ácido sulfúrico puede estar contaminado con cloruros. En este tipo de ambiente las aleaciones 316 y 317 no sirven, pero con respecto a la aleación acero inoxidable dúplex tiene un menor efecto.

Figura 7

Las curvas de isocorrosión de 0,1 mm/año del ácido sulfúrico

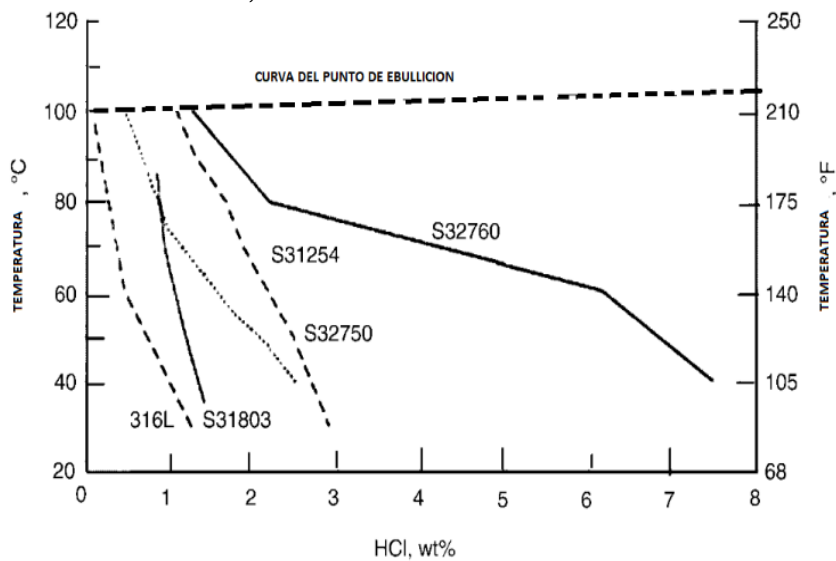


Nota. Curvas de isocorrosión de 0,1 mm/año de ácido sulfúrico a diferentes concentraciones. fuente: Stainless Steel for design engineers I (p.98), por McGuire M, 2008.

2.2.7.1.2 Ácido clorhídrico. Los aceros inoxidable dúplex tienen un alto rendimiento como se muestra en la Figura 8. Por tal motivo, estos aceros no son delicados por los diferentes pH de soluciones que contienen cloruro, pero cuando se cambia la concentración de cloruro y temperatura tienden a ser afectados.

Figura 8

Las curvas de isocorrosión de 0,1 mm/año del ácido clorhídrico



Nota: rendimiento de isocorrosión (0,1 mm/año) de dúplex en HCl en comparación con 316L.fuente: de Stainless Steel for design engineers I (p.101), por McGuire M, 2008.

2.2.7.2 Corrosión por picadura. Schweitzer (2007) aseveró que la corrosión por picadura se caracteriza por una pérdida de metal muy localizada. En el caso extremo, aparece como un agujero diminuto y profundo en una superficie que de otro modo no se vería afectada. El ancho del agujero puede aumentar con el tiempo, pero no en la medida en que aumenta la profundidad. La mayoría de las veces, la abertura de la fosa permanece cubierta con el producto de la corrosión, lo que dificulta su detección durante la inspección. Esto, junto con una pérdida insignificante de peso o la ausencia de una reducción aparente en el grosor total de la pared, brinda poca evidencia sobre la extensión del daño.

Las picaduras también pueden causar fallas estructurales debido a efectos de debilitamiento localizados, aunque quede una cantidad considerable de material sólido. También, pueden ayudar en la falla por fragilidad, la falla por fatiga, el agrietamiento asistido por el medio ambiente como el agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC) y la fatiga por corrosión, al proporcionar sitios de concentración de tensión.

El factor principal que provoca y acelera las picaduras es el contacto eléctrico entre metales diferentes, o entre lo que se denomina celdas de concentración (áreas del mismo metal donde difieren las concentraciones de oxígeno o sal conductora en el agua). Estos pares provocan una diferencia de potencial que da como resultado una corriente eléctrica que fluye a través del agua o del acero húmedo, desde el ánodo metálico hasta un cátodo cercano. Las picaduras también pueden desarrollarse en superficies metálicas limpias y descubiertas debido a irregularidades en la estructura física o química del metal.

2.2.7.3 Corrosión intergranular. La corrosión intergranular es una forma localizada de corrosión. Es un ataque preferencial a las fases de borde de grano o las zonas inmediatamente adyacentes a esta. Se observa poco o ningún ataque sobre el cuerpo principal del grano. El resultado es la pérdida de resistencia y ductilidad. El ataque suele ser rápido, penetrando profundamente en el metal y provocando fallas en piezas metálicas. Los factores que aceleran la corrosión en el límite de grano son:

- Segregación de elementos o compuestos específicos en el límite de grano, como en las aleaciones de níquel-cromo.
- Agotamiento del componente resistente a la corrosión en el límite de grano, como en el acero inoxidable austenítico

Todos estos factores que contribuyen a la corrosión intergranular se originan en el procesamiento térmico de los materiales, como la soldadura, el alivio de tensiones y malos tratamientos térmicos (Schweitzer P. 2007).

2.2.7.4 Velocidad de corrosión y pérdida de masa.

2.2.7.4.1 Densidad de corriente de corrosión. Los valores de corriente de corrosión se obtienen mediante las extrapolaciones de Tafel o mediciones de resistencia de polarización. Para convertir el valor de corriente medido o estimado en densidad de corriente se divide la corriente total por el área geométrica del electrodo expuesto a la solución tal como se muestra en la ecuación 5:

$$i_{cor} = \frac{I_{corr}}{A} \quad (5)$$

Donde:

i_{cor} : densidad de corriente de corrosión, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$

I_{cor} : corriente anódica total, μA , y

A : área expuesta de la muestra, cm^2

2.2.7.4.2 Peso equivalente. El peso equivalente (EW), puede considerarse como la masa de metal en gramos que se oxidará por el paso de un Faraday de carga eléctrica. Ver ecuación (6):

$$EW = \frac{1}{\sum \frac{n_i f_i}{W_i}} \quad (6)$$

Donde:

f_i : la fracción de masa del i -ésimo elemento en la aleación

W_i: el peso atómico del i-ésimo elemento en la aleación

n_i: la valencia del i-ésimo elemento de la aleación.

2.2.7.4.3 Velocidad de corrosión y pérdida de masa. La Ley de Faraday se puede utilizar para calcular la velocidad de corrosión, ya sea en términos de velocidad de penetración (CR) o velocidad de pérdida de masa (MR). Se usa las ecuaciones (7) y (8) respectivamente:

$$CR = K_1 \frac{i_{cor}}{\rho} EW \quad (7)$$

$$MR = K_2 i_{cor} EW \quad (8)$$

Donde:

K₁: 3.27x 10⁻³ mmg/μA cm yr

K₂: 8.954 x 10⁻³ g cm²/ μA m² d

P: densidad del acero sometido a la prueba g/ cm³

2.2.8 Análisis químico de espectrómetro

2.2.8.1 Principio. La espectrometría de emisión, este es un método de espectroscópica, que evalúa las longitudes de onda de los fotones emitidos por moléculas y átomos a medida que pasan de una situación de menor energía. Cada elemento emite un grupo característico de longitudes de onda discretas según sea la estructura electrónica. Cuando se cumplan estas longitudes de onda, se puede tener como resultado la composición elemental de la muestra. La calidad de la superficie a analizar influye decisivamente en los resultados de la medición, las superficies “limpias” aportan precisión en los resultados, por lo que se deben tener en cuenta los siguientes factores para realizar análisis químicos por espectrofotometría. La superficie del material a analizar debe ser plana. Además, esta debe estar libre de contaminación o defectos (óxido, pintura, sobrecalentamiento debido a cortes, huecos, etc. (ASTM E415, 2021).

2.2.9 Proceso de soldadura del acero inoxidable super dúplex

Para Grandwell et al., (1981) la soldabilidad en estos aceros inoxidable super dúplex es muy buena. Su elevado contenido de cromo junto con su bajo nivel de carbono

los hace prácticamente inmunes a la soldadura. La reparación por soldaduras es una herramienta para cualquier fundición que produzca piezas fundidas grandes y complejas en cualquier material. Hay una variedad de soldaduras de composición coincidente para la reparación de los aceros inoxidables super dúplex ya sea soldadura tipo SMAW (soldadura por arco metálico protegido) y GMAW (soldadura por arco metálico con gas). Estos electrodos si son recubiertos de buena manera, tienen buenas propiedades de resistencia mecánica y corrosión parecidos al material original. La soldadura de piezas en partes delgadas se puede hacer sin un posterior tratamiento térmico, mientras que la soldadura en partes gruesas se debe tratar posteriormente para eliminar la fase sigma que se forma. El equilibrio de fases austenita/ferrita es un factor importante para evitar la corrosión intergranular y posibles problemas de tenacidad dentro de la zona soldada. Este problema no es tan importante si se hace un tratamiento térmico después de la soldadura. Sin embargo, se debe descartar las zonas totalmente ferríticas en la ZAC (zona afectada por el calor) de uniones de sección gruesa.

Cuando se va a realizar la soldadura de este material se recomienda una técnica de soldadura de cordón continuo y que los electrodos sean de diámetro pequeño. Ambos factores buscan mantener bajas las temperaturas en las piezas para evitar la fragilización de la ferrita a 475 °C. Sin embargo, una buena práctica de soldadura es que se tiene que precalentar a 100 °C para evitar el problema de agrietamiento. Para piezas gruesas se tiene que hacer un tratamiento de solubilización de carburos a 1100 °C con un enfriamiento rápido.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Proceso de Fabricación:

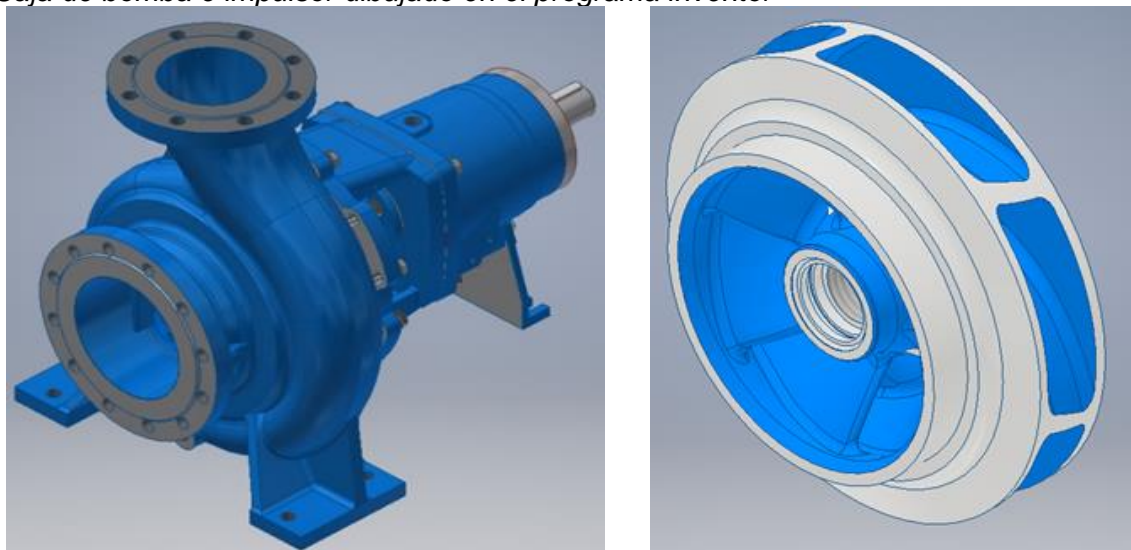
3.1.1 *Diseño y planos:*

Cuando se va a fabricar un producto en acero inoxidable super dúplex, lo primero que se debe hacer es realizar los diseños y tomar las medidas de las piezas. Estos son realizados por los dibujantes del área de diseño de la empresa Metalurgia del Fierro y el Cobre SAC (MEFICO) a base de réplicas de las piezas originales del cliente a fabricar, para luego ser plasmados y dibujados en el software Inventor y/o AutoCAD. En las Figuras 9 y 10 se muestra algunas piezas dibujadas en estos programas.

Una vez dibujados y plasmados en los planos (ver Figura 10), se manda al cliente para su aprobación respectiva de este, y luego pase a la fase de fabricación de modelos y cajas de almas (si son requeridos)

Figura 9

Caja de bomba e impulsor dibujado en el programa inventor



Nota: caja de bomba e impulsor abierto modelo Ensival, dibujo realizado en Inventor 2018. fuente: área de diseño de la empresa MEFICO.

Figura 11

Modelo de impulsor de bomba



Nota: Modelo fabricado de madera para un impulsor de bomba Ensival. fuente: elaboración propia.

Figura 12

Caja de alma del impulsor de bomba



Nota: Caja de alma fabricado de madera para un Impulsor de bomba Ensival. fuente: elaboración propia.

3.1.3 Fabricación de moldes y pintado

Una vez terminado los modelos y cajas de alma, estos son revisados por el inspector de calidad para su aprobación respectiva, después de su inspección son liberados y llevados al área de moldeo en donde son pintados con desmoldante para su posterior moldeo. En esta área se utiliza arena sílice, resina y catalizador; la proporción de

mezcla de la resina está en el rango de 1.0 a 1.2 %, mientras el catalizador está en el 25 % con respecto a la resina utilizada. La resina y catalizador son bombeados y mezclados en la máquina de moldeo y luego es vertido a los moldes para su fabricación tanto en la base y la tapa. Ver siguiente Figura 13.

Figura 13

Proceso de moldeo de piezas de acero inoxidable super dúplex



Nota: proceso de llenado y apisonado del molde. fuente: elaboración propia

Una vez culminado el molde, tanto la tapa y la base, estos son pasados al área de tapado para ser pintados y tapados, pero a la vez y paralelamente se fabrica almas con arena sílice y resina fenólica en un rango de 3 a 3.5 %, esa mezcla es secada con CO₂. Ver Figura 14 y Figura 15.

Figura 14

Alma y molde del impulsor de bomba Ensival



Nota: alma del impulsor pintado y alma puesta en la caja de moldeo. fuente: elaboración propia

Figura 15

Molde tapado de impulsor para su posterior vaciado



Nota: Molde tapado del impulsor Ensival. fuente: elaboración propia

Las almas y moldes son pintados con pintura a base zirconio con una densidad que varía de 58 a 68 ° Be (grado Baumé), siendo el valor de 68° Be para piezas de espesor 3” a más, pintar con esta densidad evita metalización y arrastre de arena que perjudique la pieza final, mientras para piezas de 3” a menos es de 58° Be (ver Figura 14); luego se realiza el tapado del molde para su posterior fundición (ver Figura 15), para evitar levantamiento de moldes por la presión metalostática se estima poner una pesa encima del molde de un valor de 50 % más del valor del peso de la pieza a fundir .

3.1.4 Fusión y vaciado

3.1.4.1 Armario y Horno de inducción. Cuando se realizó la fabricación de acero inoxidable super dúplex se utilizó un horno de inducción de mediana frecuencia modelo KGPS- 750 kW /1S, controlado mediante un panel de control de suministro de energía de frecuencia media. Ver Figura 16.

Figura 16

Equipos usados para el control de la fusión



Nota: panel de control y horno de inducción de 1500 kg. fuente: elaboración propia

3.1.4.2 Materiales. Para la fabricación del acero inoxidable super dúplex, de preferencia se selecciona metales de alta pureza (99.99 %) y ferroaleantes con contenido de carbono de 0.03% como máximo. En las figuras 17, 18 y 19 se observa los metales puros y ferroaleantes usados en la fabricación:

Figura 17

Cromo metálico y ferro cromo nitrogenado



Fuente: Elaboración propia

Figura 18

Silicio metálico y ferro molibdeno



Fuente: Elaboración propia

Figura 19

Níquel y manganeso electrolíticos



Fuente: Elaboración propia

Los metales puros y ferroaleantes son importados y validados con certificados de composición química para evitar alguna contaminación al momento de realizar el balance y su posterior fundición, mientras los lingotes de acero deben tener un contenido de carbón bajo. Los valores de los certificados de su composición química están en la Tabla 2.

Tabla 2*Composición química de las materias primas*

MATERIAL	C	SI	MN	CR	NI	MO	N	S	P
Lingotes de acero	0.010	0.01	0.20	0.008	0.01	0.001	-	-	-
Ferro cromo nitrogenado	0.080	0.7	-	60	-	-	5	-	-
Manganeso electrolítico	-	-	99.9	-	-	-	-	0.018	0.015
Silicio metálico	-	99.9	-	-	-	-	-	-	-
Cromo metálico	-	0.01	-	99.9	-	-	-	-	-
Ferro molibdeno	-	0.83	-	-	-	60	-	0.040	0.045
Níquel electrolítico	-	-	-	-	99.9	-	-	0.012	0.015

Nota: Elaboración propia.

Con la composición de la materia prima (ver Tabla 2) se usa para realizar el balance de masas para determinar el peso de la materia prima a utilizar para la fabricación del acero inoxidable super dúplex. En la Tabla 3 se muestra el cálculo de la cantidad de metales puros, ferroaleantes y acero usado en el horno de 1500 kg de capacidad.

Tabla 3*Balance de carga acero inoxidable super dúplex*

MATERIAL	Peso	%	C	SI	MN	CR	NI	MO	N	C	SI	MN	CR	NI	MO	N
Lingotes de acero	875	58.33	0.01	0.01	0.20	0.01	0.01	0.00	-	0.01	0.01	0.12	0.00	0.01	0.00	-
Ferro Cromo nitrogenado	80	5.33	0.08	0.70	-	60.00	-	-	5.00	0.00	0.04	-	3.20	-	-	0.27
Manganeso electrolítico	7	0.47	-	-	99.90	-	-	-	-	-	-	0.47	-	-	-	-
Silicio metálico	8	0.53	-	99.90	-	-	-	-	-	-	0.53	-	-	-	-	-
Cromo metálico	320	21.33	-	0.01	-	99.90	-	-	-	-	0.00	-	21.31	-	-	-
Ferro molibdeno	110	7.33	-	0.83	-	-	-	60.00	-	-	0.06	-	-	-	4.40	-
Níquel electrolítico	100	6.67	-	-	-	-	99.90	-	-	-	-	-	-	6.66	-	-
TOTAL	1500	100.0								0.01	0.64	0.58	24.52	6.67	4.40	0.27

Nota. La carga de materia prima usada en la fabricación de acero inoxidable dúplex. Fuente: elaboración propia

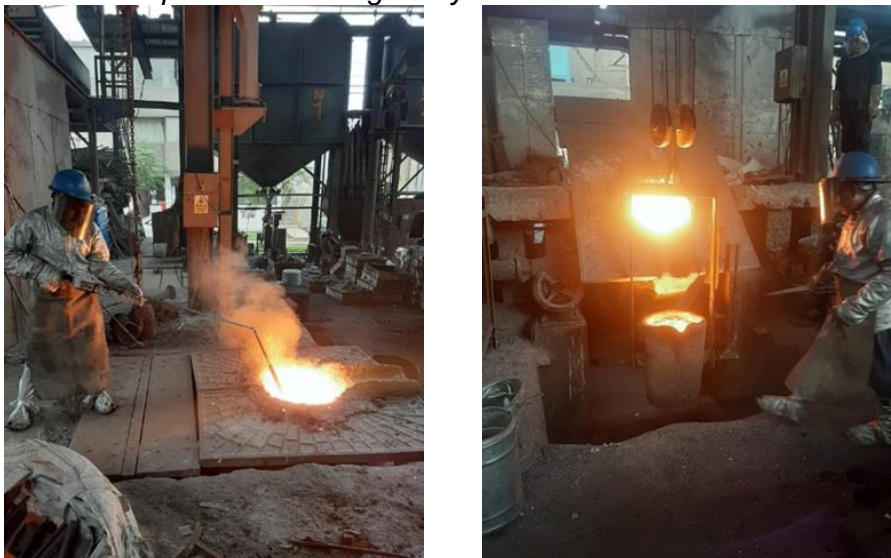
En segundo lugar, se carga la materia prima en el horno hasta tenerlo al 95 %, una vez fundida esta, se analiza su composición química mediante un equipo espectrómetro de emisión óptica modelo ESPECTRO MAX X del laboratorio de calidad de la empresa MEFICO SAC. Según los resultados obtenidos de cada elemento de composición deseada se contrastan si fuera el caso, si no están en el rango, se ajustan los porcentajes del elemento y se calcula la cantidad en kilogramos de la materia prima. Para este efecto, se usa la ecuación (9):

$$\text{Ferroaleante (Kg)} = \frac{\text{Valor requerido(\%)} - \text{Valor obtenido(\%)}}{\text{eficiencia del ferroaleante}} * 1500 \text{ Kg} \quad (9)$$

El paso anterior se repite hasta obtener el análisis químico en los rangos deseados. Si en caso no se ha completado el llenado del horno, se usa retorno del mismo material. Finalmente, se calienta el metal y se lleva a un rango de temperatura de sangrado de 1630 a 1650 °C. Esta medida se realiza con un pirómetro de Modelo FORNERO (ver Figura 20). El metal calentado es vaciado a una cuchara en la que se añade elementos desoxidantes como el calcio silicio y aluminio (ver figura 21). El calcio silicio se usa 0.5 kg y el aluminio de 0.5 kg por tonelada de metal. Una vez llenado la cuchara se procede a eliminar la escoria y posterior traslado del metal líquido.

Figura 20

Medición de la temperatura de sangrado y desoxidación del metal



Fuente: elaboración propia.

Es importante el control de la temperatura para evitar que el metal adquiera gases, tenga juntas frías o no tenga un buen recorrido y en consecuencia piezas incompletas. Además, la desoxidación con aluminio y calcio silicio garantiza que metal fundido no presente porosidades tanto interna como externamente cuando se va a solidificar la pieza metálica. Luego de estos pasos, se procede a fundir las piezas (ver Figura 21) en un rango de temperatura de 1570 a 1590°C, según sea el espesor. A piezas más delgadas se deben fundir en valores cercanos a 1590°C y para piezas gruesas en valores que bordean los 1570°C.

Figura 21

Hornero vertiendo el metal liquido sobre el molde



Nota. Elaboración: Fuente propia

Después de realizar el vaciado del metal líquido se pasa al área de desplome para su enfriamiento y posterior desplome de las piezas.

3.1.5 Tratamiento térmico

Después de desplomar la pieza, se realiza un tratamiento térmico de solubilización bajo la norma ASTM A 890 (ver figura 23). Para esto se utilizó un horno a gas controlado

con un PLC de marca Unitronics modelo V570. Este tratamiento consiste en calentar la pieza a 150°C /h hasta alcanzar una temperatura de 1120 °C, mantener a 30 minutos más 1 hora por pulgada de espesor de la pieza a tratar (Figura 23), luego enfriar al agua. Este enfriamiento brusco es para evitar que se precipiten fases intermetalicas como la sigma y chi.

Figura 22

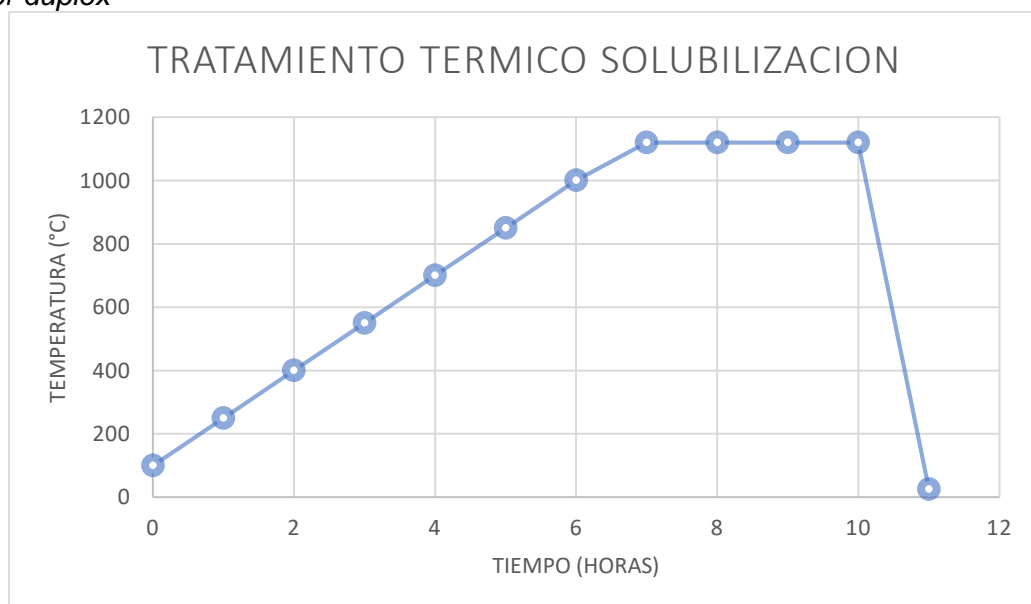
Piezas de acero inoxidable calentadas a 1120°C



Nota. Impulsores y partes de bombas saliendo del horno de tratamiento térmico. Elaboración: Fuente propia

Figura 23

Curva de tratamiento térmico de solubilización usada en la fabricación de acero inoxidable super dúplex



Nota. Elaboración: Fuente propia

Después del tratamiento térmico las piezas son llevadas al área de acabados, para cortar los alimentadores y canales de la pieza fabricada para su inspección por el área de control de calidad de la empresa MEFICO SAC (Ver Figura 24).

Figura 24

Pieza de acero inoxidable super dúplex después de tratamiento térmico



Nota. Impulsor granallado después de tratamiento térmico. Elaboración: Fuente propia

3.1.6 Acabado final

En esta etapa se debe de dar un buen acabado superficial de la pieza, eliminando rebabas, rugosidades y cortando los ataque y alimentadores de la pieza. Para esto se utilizan esmeriles angulares, neumáticos de barca Bosch y también se repara pequeños defectos con una máquina de soldar marca MILLER 650 y con una soldadura Avesta 2209-16

Algunas piezas presentan y necesitan precisión, y se da en el proceso de mecanizado. En dicho proceso se toma como referencia las tolerancias dimensionales de piezas mecanizadas bajo la norma DIN 7168 al momento de realizar el mecanizado de este tipo de pieza fundida. Ver Figura 25.

Figura 25

Mecanizado de una pieza en acero inoxidable super dúplex



Nota. Impulsor en el área de mecanizado. Fuente: elaboración propia

Una vez culminado el acabado final, se realiza los ensayos no destructivos, como inspección visual, líquidos penetrantes y ensayo de dureza; para garantizar la calidad de fabricación de las piezas fundidas en aceros inoxidables super dúplex. Esto es realizado por los inspectores de control de calidad con certificación ANSI / ASNT CP -189-2015 NIVEL II en ensayos no destructivos.

3.1.7 Ensayos no destructivos

3.1.7.1 Inspección visual. El primer ensayo no destructivo realizado es la inspección visual, el cual utiliza la norma ASTM A802, en donde menciona nueve categorías de criterios de aceptación superficial de una pieza fundida, y cada uno de estos presentan hasta cuatro niveles de calidad en donde el primer nivel es el de mejor calidad y el cuarto es de baja calidad. Ver Figura 26

Figura 26

Impulsor en acero inoxidable super dúplex



Nota. La superficie del impulsor presenta nivel 2 en cuanto a la calidad superficial de la pieza. Fuente: elaboración propia

La superficie de la pieza fundida es comparada según la textura elaborado por la Steel Castings Research and Trade Association (SCRATA), en donde se muestra fotos con los diferentes niveles según las nueve categorías de defectos superficiales en piezas fundidas.

3.1.7.2 Líquidos penetrantes. El control de líquidos penetrante para las piezas fundidas se siguió la norma ASTM E165 de Práctica estándar para Examen de líquidos penetrantes, para la prueba se utilizó el tipo II de líquidos visibles, método C que usa un solvente para remover el líquido.

En primer lugar, se debe tener la superficie libre de rugosidad y aspereza para evitar que se den falsas indicaciones luego de verificar se limpia la superficie con el limpiados (CLEANER) de marca Cantesco (ver Figura 27). En segundo lugar, se aplica el líquido penetrante (PENETRANT) de la marca Cantesco para la determinación de defectos en la superficie. En la Figura 28 se aprecia el líquido penetrante rociado en toda la pieza.

Figura 27

Limpieza de superficie del impulsor



Nota. Impulsor antes del análisis de líquidos penetrantes. fuente: área de control de calidad de la empresa MEFICO

Figura 28

Impulsor con líquidos penetrante



Nota. Aplicación del líquido penetrante en la superficie del impulsor. fuente: área de control de calidad de la empresa MEFICO

Luego de 10 minutos se realiza la limpieza del líquido para posteriormente aplicar el revelador (DEVELOPER). Este líquido blanquecino indicará todas las fisuras no visibles (ver Figura 29). En esta última parte se realizará el análisis de la superficie bajo la norma ASTM A903 de Especificación estándar para fundiciones de acero, criterios de aceptación de superficies, inspección de partículas magnéticas y líquidos penetrantes.

Figura 29

Impulsor con el revelador



Nota. Impulsor con líquido revelador fuente: elaboración propia

Luego de verificar con la norma ASTM A 903, se realiza la limpieza del revelador de la pieza metálica se corrige los errores existentes y nuevamente se pasa los líquidos penetrantes para detectar si hay otros defectos, en caso de que no estén presentes los inspectores realizaran el siguiente ensayo no destructivo de control dimensional.

3.1.7.3 Control dimensional. El control dimensional se realiza bajo la norma ISO 8062-3:2007. Esta tiene tablas de tolerancias dimensionales y geométricas, las medidas son realizadas por vernier, profundímetros y calibradores de marca INSIZE que son calibrados anualmente. Estas medidas son comparadas con el plano del cliente, si existe alguna diferencia se verifica con las tablas y si estas son aceptables la pieza es liberada por el inspector y pasa a ser preparada y despachada. Los grados de las tablas de tolerancias han sido estandarizados por el área de control de calidad de la empresa MEFICO.

3.1.7.3.1 Tolerancias Lineales. En la tabla 4 se muestran los grados de tolerancia dimensional lineal para fundición (DCTG). Esta es aplicable para piezas fundida en arena en general. Las medidas son realizadas con vernier de marca y wincha de marca.

Tabla 4

*Grados de tolerancia dimensional lineal para fundición (DCTG)**

Dimensiones relacionado a la pieza moldeada		DCTG	DCTG	DCTG	DCTG	DCTG	DCTG	DCTG	DCTG	DCTG	DCTG	DCTG	DCTG	DCTG	DCTG	DCTG	DCTG
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16 ©
---	≤ 10	0.09	0.13	0.18	0.26	0.36	0.52	0.74	1	1.5	2	2.8	4.2	---	---	---	---
> 10	≤ 18	0.1	0.14	0.2	0.28	0.38	0.54	0.78	1.1	1.6	2.2	3	4.4	---	---	---	---
> 16	≤ 25	0.11	0.15	0.22	0.3	0.42	0.58	0.82	1.2	1.7	2.4	3.2	4.6	6	8	10	12
> 25	≤ 40	0.12	0.17	0.24	0.32	0.46	0.64	0.9	1.3	1.8	2.6	3.6	5	7	9	11	14
> 40	≤ 63	0.13	0.18	0.26	0.36	0.5	0.7	1	1.4	2	2.8	4	5.6	8	10	12	16
> 63	≤ 100	0.14	0.2	0.28	0.4	0.56	0.78	1.1	1.6	2.2	3.2	4.4	6	9	11	14	18
> 100	≤ 160	0.15	0.22	0.3	0.44	0.62	0.88	1.2	1.8	2.5	3.6	5	7	10	12	16	20
> 160	≤ 250	---	0.24	0.34	0.5	0.7	1	1.4	2	2.8	4	5.6	8	11	14	18	22
> 250	≤ 400	---	---	0.4	0.56	0.78	1.1	1.6	2.2	3.2	4.4	6.2	9	12	16	20	25
> 400	≤ 630	---	---	---	0.64	0.9	1.2	1.8	2.6	3.6	5	7	10	14	18	22	28
> 630	≤ 1000	---	---	---	---	1	1.4	2	2.8	4	6	8	11	16	20	25	32
> 1000	≤ 1600	---	---	---	---	---	1.6	2.2	3.2	4.6	7	9	13	18	23	29	37
> 1600	≤ 2500	---	---	---	---	---	---	2.6	3.8	5.4	8	10	15	21	26	33	42
> 2500	≤ 4000	---	---	---	---	---	---	---	4.4	6.2	9	12	17	24	30	38	49
> 4000	≤ 6300	---	---	---	---	---	---	---	---	7	10	14	20	28	35	44	56
> 6300	≤ 10000	---	---	---	---	---	---	---	---	---	11	16	23	32	40	50	64

Nota: Fuente ISO 8062-3:2007

3.1.7.3.2 Tolerancias Geométricas. En las tablas 5, 6, 7 y 8 se indica las tolerancias Geométricas GCTG 6 de perpendicularidad, planitud, circularidad para piezas fundidas. Las medidas son vernier, profundímetros y goniómetro de marca INSIZE.

Tabla 5

Tolerancias de rectitud para fundición (mm)

Dimensiones		GCTG	GCTG	GCTG	GCTG	GCTG	GCTG	GCTG
relacionado a la pieza moldeada		2	3	4	5	6	7	8
---	≤ 10	0.08	0.12	0.18	0.27	0.4	0.6	0.9
> 10	≤ 30	0.12	0.18	0.27	0.4	0.6	0.9	1.4
> 30	≤ 100	0.18	0.27	0.4	0.6	0.9	1.4	2
> 100	≤ 300	0.27	0.4	0.6	0.9	1.4	2	3
> 300	≤ 1000	0.4	0.6	0.9	1.4	2	3	4.5
> 1000	≤ 3000	---	---	---	3	4	6	9
> 3000	≤ 6000	---	---	---	6	8	12	18
> 6000	≤ 10000	---	---	---	12	16	24	36

Nota: Fuente ISO 8062-3:2007

Tabla 6

Tolerancia de planitud para fundición (mm)

Dimensiones relacionado a la pieza moldeada		GCTG	GCTG	GCTG	GCTG	GCTG	GCTG	GCTG
		2	3	4	5	6	7	8
---	≤ 10	0.12	0.18	0.27	0.4	0.6	0.9	1.4
> 10	≤ 30	0.18	0.27	0.4	0.6	0.9	1.4	2
> 30	≤ 100	0.27	0.4	0.6	0.9	1.4	2	3
> 100	≤ 300	0.4	0.6	0.9	1.4	2	3	4.5
> 300	≤ 1000	0.6	0.9	1.4	2	3	4.5	7
> 1000	≤ 3000	---	---	---	4	6	9	14
> 3000	≤ 6000	---	---	---	8	12	18	28
> 6000	≤ 10000	---	---	---	16	24	36	56

Nota: Fuente ISO 8062-3:2007

Tabla 7*Tolerancia de redondez, paralelismo, perpendicularidad y simetría de fundición (mm)*

Dimensiones		GCTG	GCTG	GCTG	GCTG	GCTG	GCTG	GCTG
relacionado a la pieza								
moldeada		2	3	4	5	6	7	8
---	≤ 10	0.18	0.27	0.4	0.6	0.9	1.4	2
> 10	≤ 30	0.27	0.4	0.6	0.9	1.4	2	3
> 30	≤ 100	0.4	0.6	0.9	1.4	2	3	4.5
> 100	≤ 300	0.6	0.9	1.4	2	3	4.5	7
> 300	≤ 1000	0.9	1.4	2	3	4.5	7	10
> 1000	≤ 3000	---	---	---	6	9	14	20
> 3000	≤ 6000	---	---	---	12	18	28	40
> 6000	≤ 10000	---	---	---	24	36	56	80

Nota: Fuente ISO 8062-3:2007

Tabla 8*Tolerancia de coaxialidad para fundición (mm)*

Dimensiones		GCTG	GCTG	GCTG	GCTG	GCTG	GCTG	GCTG
relacionado a la								
pieza moldeada		2	3	4	5	6	7	8
---	≤ 10	0.27	0.4	0.6	0.9	1.4	2	3
> 10	≤ 30	0.4	0.6	0.9	1.4	2	3	4.5
> 30	≤ 100	0.6	0.9	1.4	2	3	4.5	7
> 100	≤ 300	0.9	1.4	2	3	4.5	7	10
> 300	≤ 1000	1.4	2	3	4.5	7	10	15
> 1000	≤ 3000	---	---	---	9	14	20	30
> 3000	≤ 6000	---	---	---	18	28	40	60
> 6000	≤ 10000	---	---	---	36	56	80	120

Nota: Fuente ISO 8062-3:2007

Una vez medido la pieza fundida y observar que no exista algunas medidas fuera de las tolerancias, esta es liberada y llevada al área de despacho para su pintado (si fuera necesario) y su embalaje correspondiente.

3.1.8 Control de dureza

La dureza se realizó con el Pin Brinell modelo CPIT de la marca Newage, con rango de medición de HB100 a HB 700. Estos valores se encuentran en la tabla del equipo. Primero es aplicada una carga mediante un martillo, esta fuerza es controlada por un pasador de cizalla que se rompe con el golpe y la hendidura hecha es medida para determinar la dureza del material. Este ensayo se realiza bajo la norma ASTM E 10.

3.1.9 Evaluación de propiedades mecánicas

Se realizó las pruebas mecánicas de tracción y Charpy, estas fueron dados bajo la norma ASTM A 370 (Método estándar para pruebas mecánicas de productos de acero). Se fundió probetas y sometidas al mismo tratamiento térmico de las piezas, luego fueron mecanizadas por un torno, siguiendo las medidas bajo la anterior norma. Los resultados de estas pruebas fueron un indicador para ver si el proceso propuesto es ideal para la fabricación de este tipo de material.

3.1.9.1 Prueba de tracción. Las probetas para la prueba de tracción fueron mecanizadas bajo la norma ASTM A 370. Las medidas de las probetas fueron tomadas por un vernier digital, marca MITUTOYO, con una aproximación de 0.01 mm. Estas probetas mecanizadas fueron llevadas a la Máquina Universal de Ensayos Mecánico, marca LG, de capacidad de 60 toneladas que pertenece al Laboratorio N°4 de La facultad de Mecánica de la UNI. Las condiciones de ensayo se realizaron a una temperatura de 21° C y a una humedad relativa de 75 %. Los parámetros que se obtiene en esta prueba son la Fuerza de fluencia, fuerza máxima y elongación.

3.1.9.2 Prueba de Charpy. De la misma manera, la probeta de acero inoxidable fue mecanizada bajo la norma ASTM A 370. Después del mecanizado se llevó las probetas a la Máquina de impacto, marca ZWICK / ROELL, capacidad 450J que pertenece al Laboratorio N°4 de La facultad de Mecánica de la UNI. Las condiciones de ensayo se realizaron a una temperatura de -40° C y a una humedad relativa de 75 %.

3.1.10 Evaluación metalográfica

Para determinar la distribución de las fases austeníticas y ferríticas del acero inoxidable super dúplex, se utilizaron un microscopio óptico que pertenece al Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica (FIGMM) y un microscopio electrónico de barrido del laboratorio de la Facultad de Ciencias (FC) ambas de la Universidad Nacional de Ingeniería.

3.1.10.1 Metalografía con microscopio óptica. Primero, Las muestras fueron preparadas bajo la norma ASTM E 3 para la metalografía por el método del desbaste grueso, medio y fino con papeles abrasivos de medidas de 60, 100, 120, 200, 400, 600, 1000, 1500 y 2000. Segundo, estas muestras fueron llevadas a la pulidora metalográfica. Con el objetivo de obtener una superficie libre de asperezas se utilizó un paño fino con Alúmina (Al_2O_3) de $0.5 \mu\text{m}$ como abrasivo. Finalmente, se atacó las muestras con el reactivo Beraha's. Este reactivo fue preparado bajo la norma ASTM E407 compuesto de 125 ml de agua, 25 ml de HCl, 3.0 g de Bifluoruro de amonio y pocos gramos de metabisulfito de potasio. El ataque tuvo lugar durante 5 minutos. Luego, las muestras fueron llevadas al Microscopio óptico de marca Zeiss Axio para su respectivo análisis. Ver Figura 30.

Figura 30

Microscopio óptico



Nota: Microscopio óptico marca Zeiss modelo Axio del laboratorio de la FIGMM.

Se realizó el análisis de probetas de dos tipos de probetas una en as-cast (sin tratamiento) y la otra con tratamiento. Esto es para ver la diferencia de la distribución de áreas y la formación de fases perjudiciales (σ y χ) cuando no se realiza el tratamiento térmico. Además, para realizar un cálculo más exacto de las áreas de la fase ferrítica y austenítica de las 2 probetas mediante el programa Imagen J.

3.1.10.2 Metalografía con microscopio electrónica barrido (SEM). Para la determinación de las imágenes se realizó con un microscopio electrónico de barrido (SEM) marca ZEISS y modelo EVO MA 10. Además, se utilizó la técnica de EDS (Espectroscopía de Energía Dispersada) para determinar caracterización química y análisis elemental de las fases secundarias del acero inoxidable super dúplex que no se pueden detectar con el microscopio óptico. Ver Figura 31

Figura 31

Microscopio electrónico de barrido



Nota: Microscopio electrónico de barrido marca Zeiss modelo Axio del laboratorio de la FC.

En este análisis se utilizó las mismas probetas y el mismo tipo de ataque que la microscopía óptica. Asimismo, la prueba se realizó bajo la norma ASTM E 1508 que es una

guía para el análisis de más exactitud cada fase del acero inoxidable super dúplex. Las composiciones de las fases secundarias como la sigma y chi, estas deben ser ricas en Cromo y Molibdeno. La fase sigma se debería encontrarse dentro de la fase ferrítica y mientras el chi se debería encontrar en los bordes de grano de la fase ferrítica. La otra fase que se debería encontrar en este acero inoxidable super dúplex por su nitrógeno es el Cr₂N, con una composición con alto contenido de nitrógeno.

3.1.11 Evaluación de la prueba de corrosión

Para la prueba de corrosión las muestras fueron mecanizadas previamente con un diámetro de 7.4 mm. Las pruebas fueron realizadas bajo la norma de ASTM G 102. La solución de la prueba fue preparada disolviendo 100g de cloruro férrico en 900 ml de agua, y la temperatura de prueba fue de 25 ° C. Las pruebas fueron realizadas en el Laboratorio de Corrosion de la Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica (FIGMM) y el equipo utilizado fue Potenciostato Gamry Reference 3000.

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1. Proceso de fundición

El acero inoxidable super dúplex que se fabricó en un horno de inducción del área de fundición, tiene la composición química que se muestra en la Tabla 9, estos valores fueron obtenidos vía espectrometría de emisión óptica. En esta tabla se observa que los valores de los elementos químicos se encuentran en los límites establecidos por la norma ASTM A890 grado 5 A.

Tabla 9

Composición química del acero obtenido en la fundición

	%C	%Si	% Ni	%Cr	%Mo	% N	%Fe	%Cu
Deseada	0.03 máx.	0.5- 0.7	6.0- 8.0	24.0- 26.0	4.0- 5.0	0.1-0.3	Bal.	Bal.
Fusión 1	0.03	0.60	6.10	25.50	4.00	0.28	Bal.	0.01

Nota: Fuente: elaboración propia

Una forma de determinar el efecto de los aleantes es por medio del Ni equivalente que son elementos estabilizadores de austenita, o también por Cr equivalente si son elementos alfégenos y finalmente el porcentaje de ferrita que debería de tener. Para el cálculo de estos parámetros se usa los valores que están en la Tabla 9, estas fueron calculadas con las ecuaciones (1), (2) y (3):

$$Cr_{eq} = 25.5 + 1.73 \times 0.60 + 0.88 \times 4.0 = 30.1$$

$$Ni_{eq} = 6.1 + 24.55 \times 0.03 + 21.75 \times 0.28 + 0.4 \times 0.01 = 12.93$$

$$\%Ferrite = -2.93 + 4.01 \times 30.1 - 5.6 \times 12.93 + 0.016 \times 1120 = 63\%$$

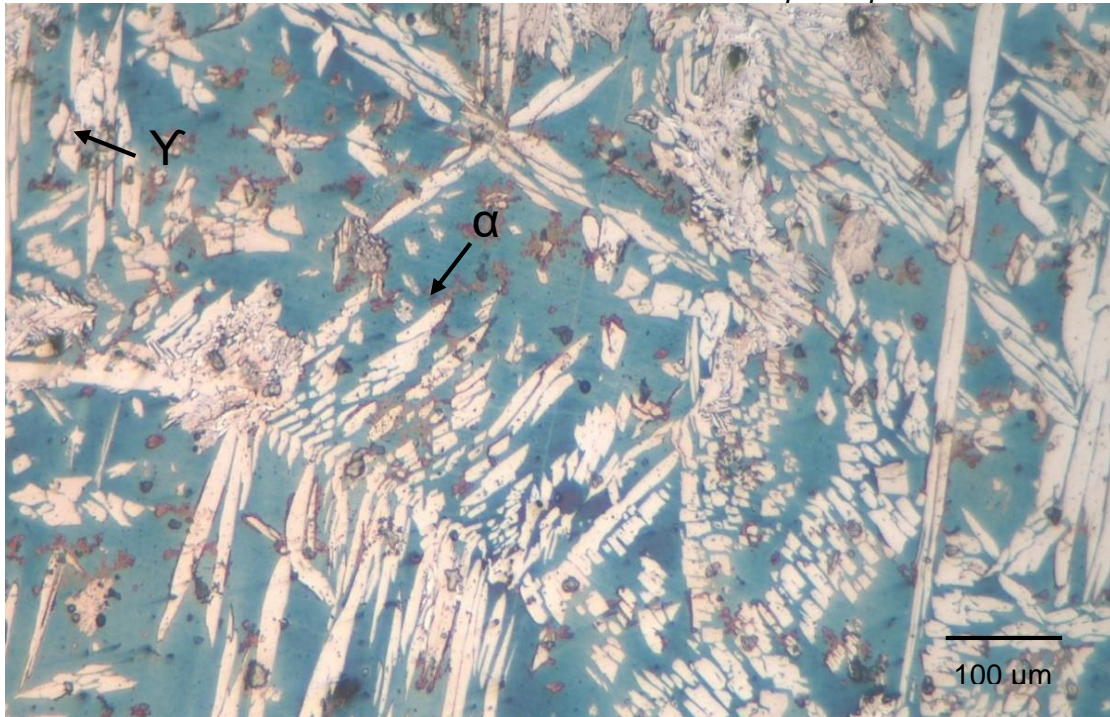
Los resultados arrojan un porcentaje de ferrita de teórica en la fusión de 63% y austenita sería 37 %. Estos valores serán corroborados en la parte metalográfica. En caso de tener piezas con espesores mayores a cinco pulgadas se buscará que se obtenga una mayor concentración de austenita, con el objetivo de minimizar la precipitación de la fase sigma durante la solidificación y obtener un equilibrio microestructural.

4.2 Proceso de tratamiento térmico:

Se realizó varias pruebas de tratamientos térmicos de solubilización a nivel de laboratorio del acero inoxidable super dúplex para buscar la temperatura ideal, el mejor resultado se dio a una temperatura de 1120°C. Este valor de temperatura se utilizó para realizar los tratamientos térmicos de las piezas fabricadas, las probetas de ensayos mecánicos y probetas para la prueba de corrosión. Se realizó análisis metalográfico a una pieza sin tratamiento (as-cast), ver Figura 32 y otra con tratamiento térmico, ver Figuras 33 y 34.

Figura 32

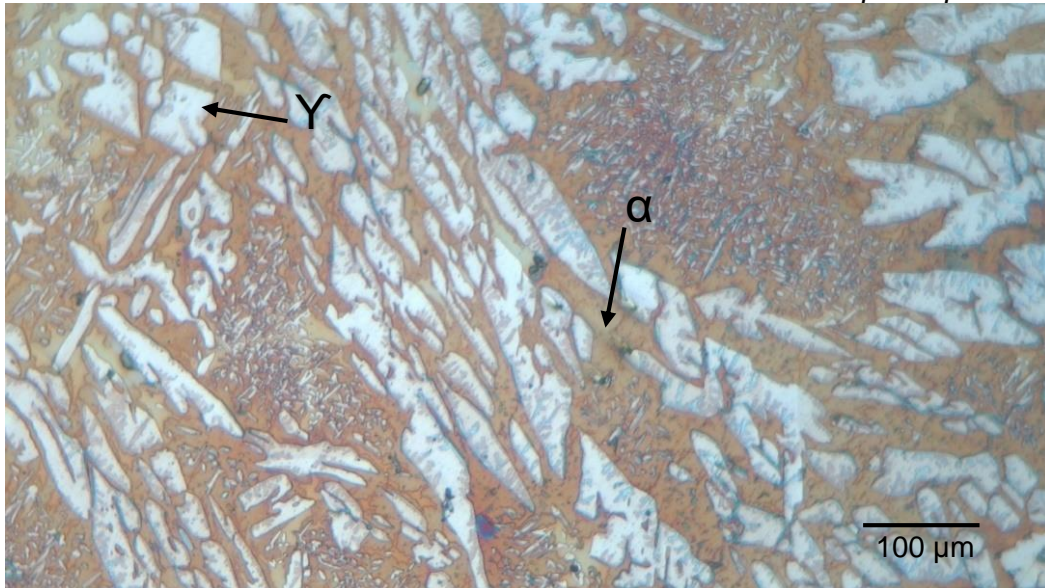
Microestructura sin tratamiento térmico de acero inoxidable super dúplex



Nota: Metalografía con ataque Beraha's con un aumento de 100 X. La parte clara es la austenita, la parte oscura es la ferrita. Fuente: elaboración propia

Figura 33

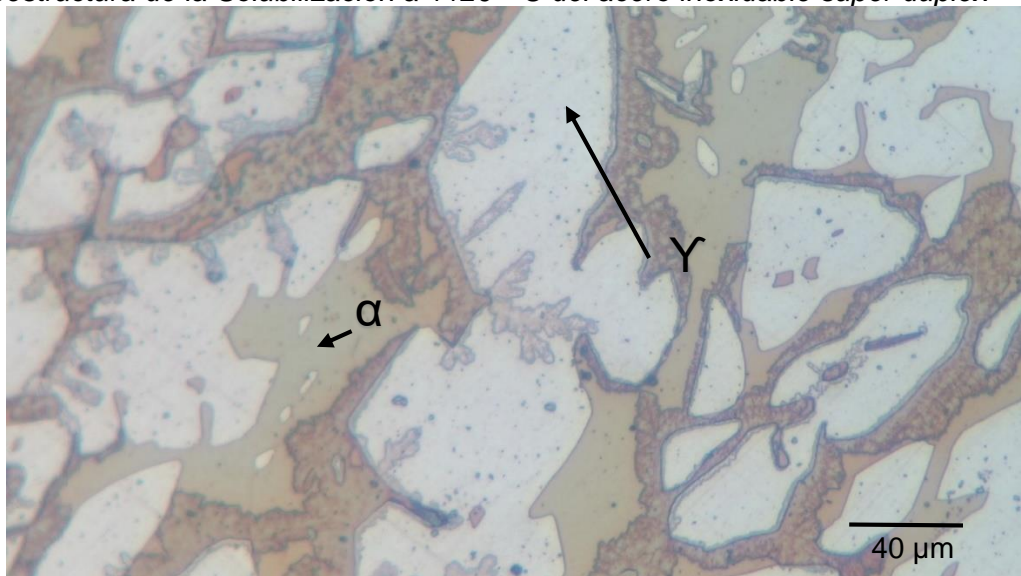
Microestructura de la Solubilización a 1120 ° C del acero inoxidable super dúplex



Nota: Metalografía con ataque Beraha's con un aumento de 100 X. La parte clara es la austenita, la parte oscura es la ferrita. Fuente: elaboración propia

Figura 34

Microestructura de la Solubilización a 1120 ° C del acero inoxidable super dúplex



Nota: Metalografía con ataque Beraha's con un aumento de 400 X. La parte clara es la austenita, la parte oscura es la ferrita. Fuente: elaboración propia

En la Figura 32 se muestra la formación de las agujas de austenita Widmanstätten y un crecimiento no uniforme. En las Figuras 33 y 34 se observan una estructura homogénea gracias al nitrógeno y al tratamiento térmico de solubilización realizada a 1120° C.

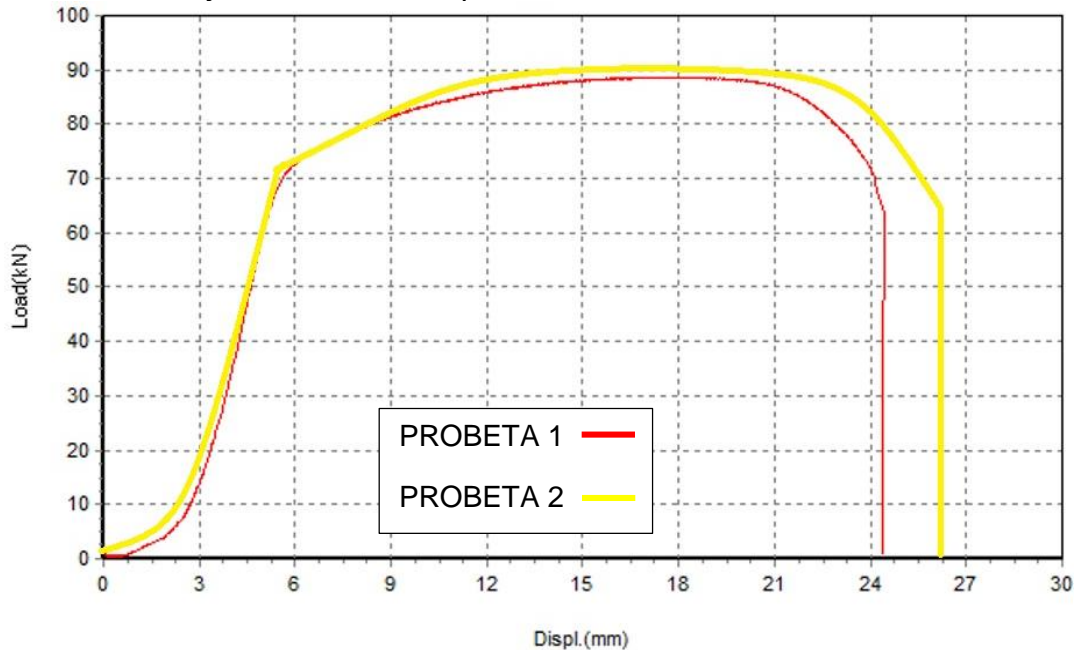
4.3 Ensayos

4.3.1 Ensayo de tracción

En la tabla 10 se observa los resultados del Ensayo de tracción del acero inoxidable super dúplex fabricado, puede destacarse que el Cromo y el Nitrógeno tiene un efecto de aumentar las propiedades mecánicas (esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo y elongación) superando a los aceros inoxidable dúplex comunes. En la Figura 35 observamos el comportamiento de los ensayos de tracción realizados en el laboratorio N°4 de la Facultad de Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Figura 35

Grafica de los Ensayos de Tracción de probetas



Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 10

Resultados del Ensayo de Tracción

Probeta	Diámetro (mm)	Longitud Inicial (mm)	Longitud Final (mm)	Fuerza de Fluencia (kN)	Fuerza Máxima (kN)	Esfuerzo Fluencia (MPa)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Elongación %
1	12.84	50.00	67.52	70.18	88.72	541.99	685.18	35.04
2	12.97	50.00	68.99	70.66	89.96	534.82	680.89	37.98

Nota. Fuente: Laboratorio N°4 de la Facultad de Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería.

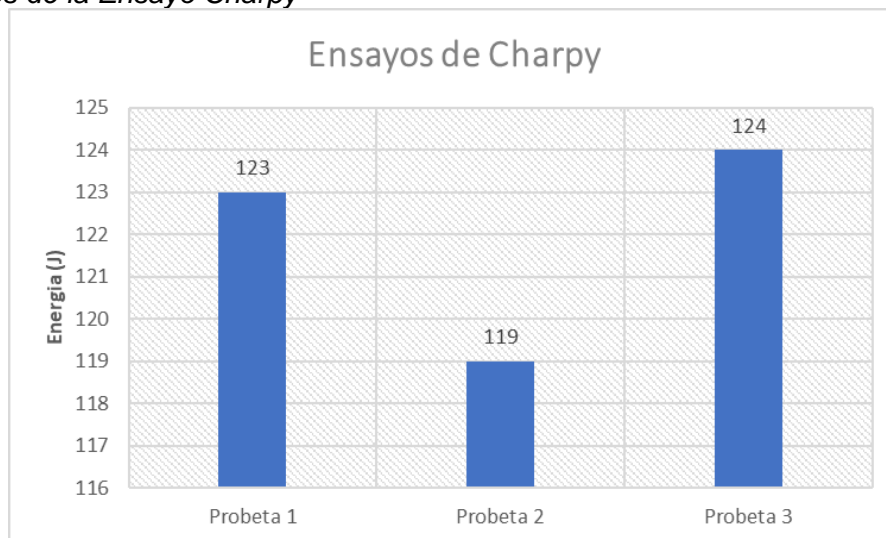
Los valores de las 2 pruebas están en un promedio de esfuerzo de fluencia de 538.4 MPa, esfuerzo máximo de 683 MPa y una elongación de 36.51 %. Estos valores del esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo y elongación están de acuerdo con la norma ASTM A 890.

4.3.2 *Ensayo de Charpy*

El ensayo de Charpy se mandó a realizar en el laboratorio N°4 de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería, a una temperatura de -40°C porque a esta temperatura baja la ductilidad en los aceros inoxidable super dúplex. Los resultados de las pruebas se muestran en la Figura 36.

Figura 36

Resultados de la Ensayo Charpy



Nota. Fuente: Elaboración propia

Los valores de las 3 pruebas están en un promedio de 122 J. Este valor está dentro del rango establecido por la norma ASTM A 923. Además, esta prueba tiene como propósito permitir la detección de la presencia de fases Intermetálicas en aceros inoxidable dúplex, según la norma mencionada.

4.3.3 *Ensayo de Dureza*

El ensayo de dureza se realizó en la superficie de las distintas piezas fabricadas en acero inoxidable super dúplex, obteniendo los siguientes resultados que se muestra en tabla 11.

Tabla 11

Valores de dureza del acero inoxidable super dúplex

Dureza	Valor (HB)
Pieza 1	265
Pieza 2	280
Pieza 3	265
Pieza 4	265
Pieza 5	280
Promedio	271

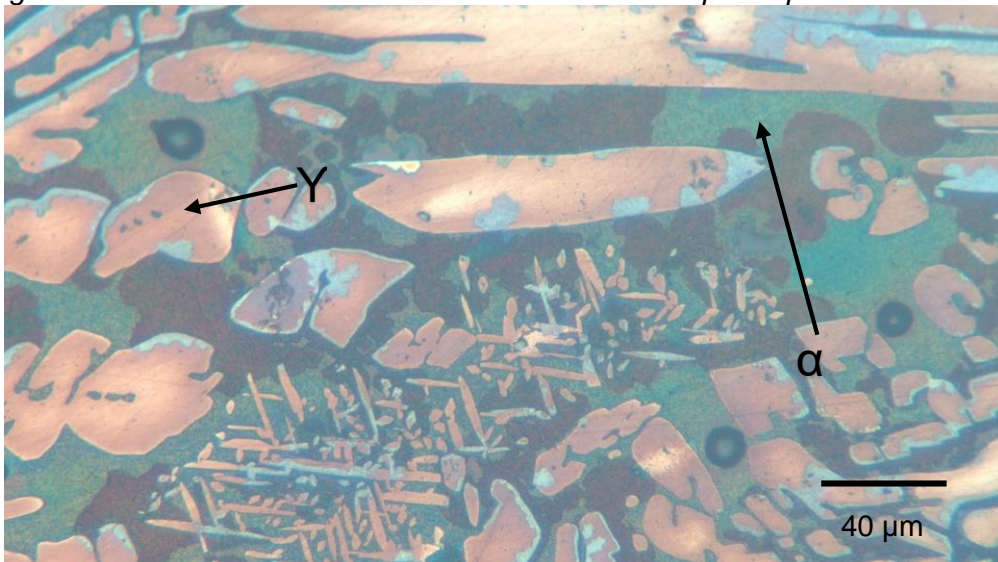
Nota. Datos proporcionados por el área de control de calidad de la empresa MEFICO

4.4 Microscopia Óptica

La microscopia óptica se realizó para corroborar con el valor obtenido del porcentaje de ferrita calculado a través de la ecuación (3) y que no presenten fases secundarias que limiten las propiedades de tanto mecánico y de corrosión. Por tal motivo se realizó la metalografía a una pieza en as-cast y una tratada para ver las diferencias entre estas. Los resultados obtenidos son mostrados en la Figura 37 y 38:

Figura 37

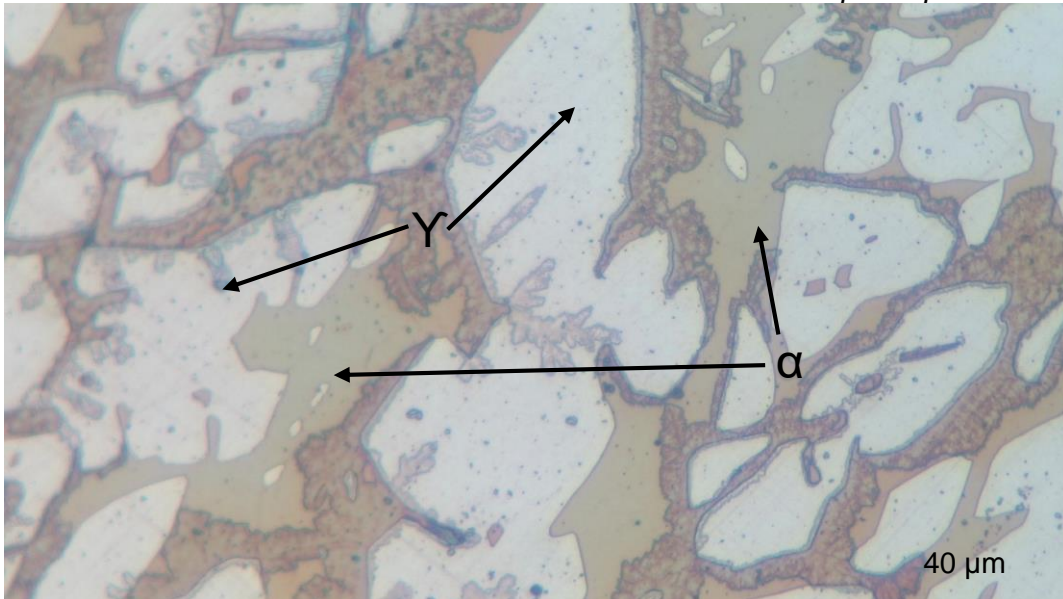
Metalografía Sin tratamiento térmico del acero inoxidable super dúplex



Nota: Metalografía con ataque Beraha's con un aumento de 400 X, presenta austenita (parte clara) en la matriz de ferrítica (parte marrón oscuro y verde oscuro), Fuente: elaboración propia

Figura 38

Microestructura de la Solubilización a 1120 ° del acero inoxidable super dúplex

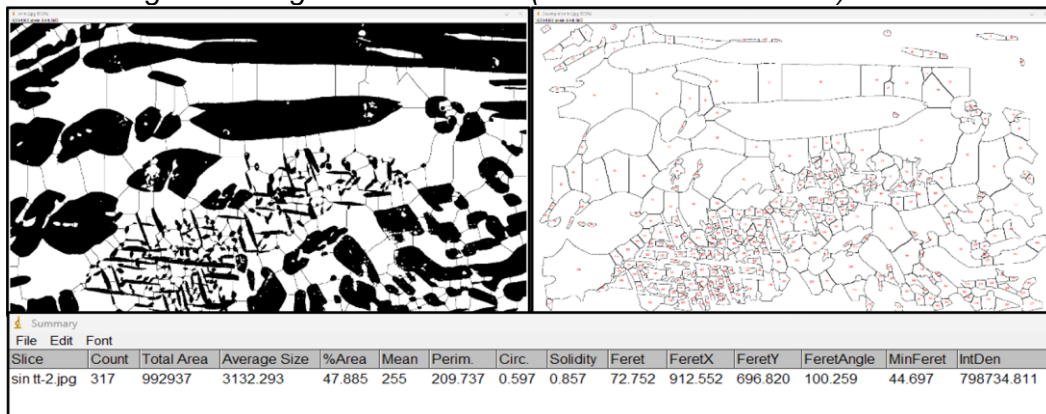


Nota: Metalografía con ataque Beraha's con un aumento de 400 X, presenta austenita (parte blanca) en la matriz de ferrítica (parte amarilla y marrón clara), Fuente: elaboración propia

Los cálculos de las áreas se realizaron mediante el programa Imagen J de la fase ferrítica y austenítica del acero inoxidable super dúplex en as-cast y con tratamiento térmico de solubilización, los resultados se muestran en la figura 39 y Figura 40:

Figura 39

Análisis de imagen metalográfica en as-cast (sin tratamiento térmico)

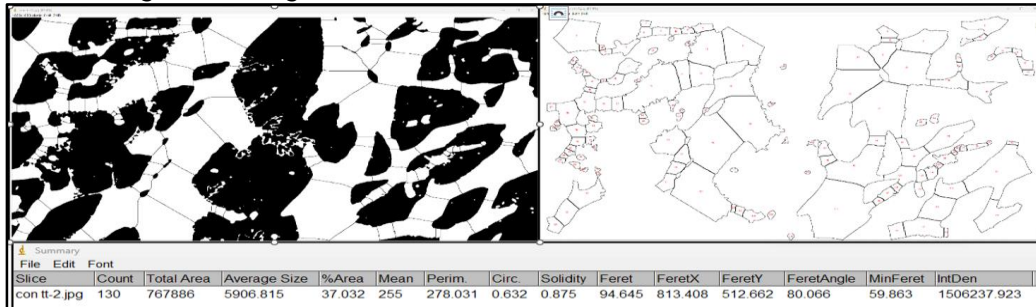


Nota: Análisis con el programa de Imagen J, nos da un área de la fase austenítica que da un valor a 47.885 %, Fuente: elaboración propia

Este bajo contenido de ferrita dado por el software Imagen J, es debido a la pequeña gradiente de enfriamiento cuando se solidifica, esto hizo que se aumentara el contenido de austenita en la microestructura final; para saber que fases secundarias presentan, se realizara un análisis más profundo con el Microscopía Electrónica de Barrido.

Figura 40

Análisis de imagen metalográfica con tratamiento térmico



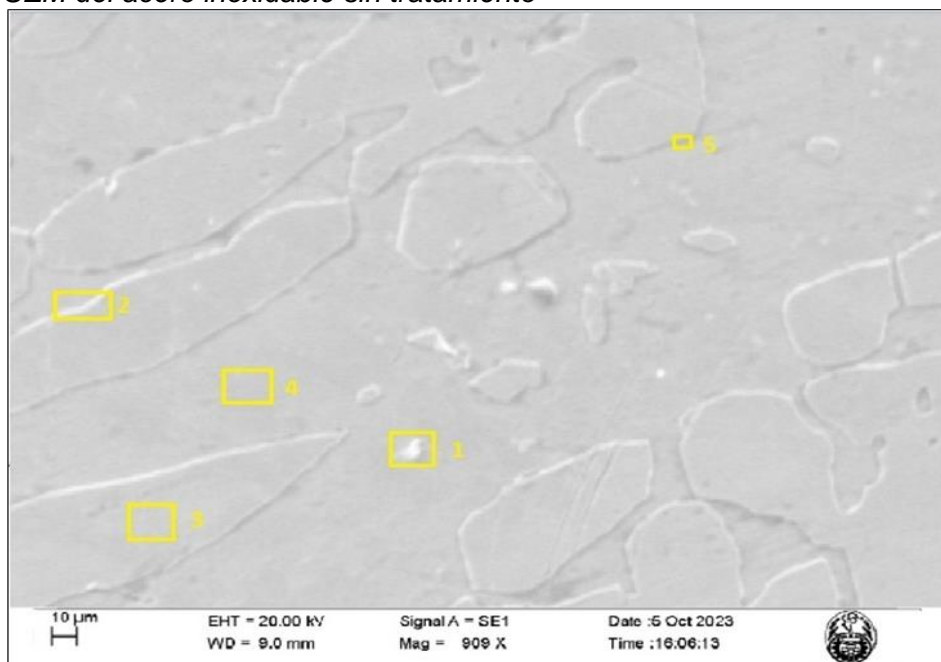
Nota: Análisis con el programa de Imagen J, nos da un área de la fase austenítica que da un valor a 37.032 %, Fuente: elaboración propia

4.5 Microscopia Electrónica de Barrido

El primer análisis de las imágenes SEM es de una pieza que no tiene tratamiento térmico (ver Figura 41) y la segunda es el análisis de una pieza que tiene tratamiento térmico (ver Figura 43). La forma que se identificaron y analizaron fue por variación del contraste de la imagen y se identificó 5 puntos en la Figura 41. Luego esos puntos se realizó un análisis EDS para determinar su composición química (ver figura 42). El primer y segundo análisis tienen un mayor contenido de Cromo y Molibdeno y la quinta tiene un contenido de Nitrógeno mayor a la composición original.

Figura 41

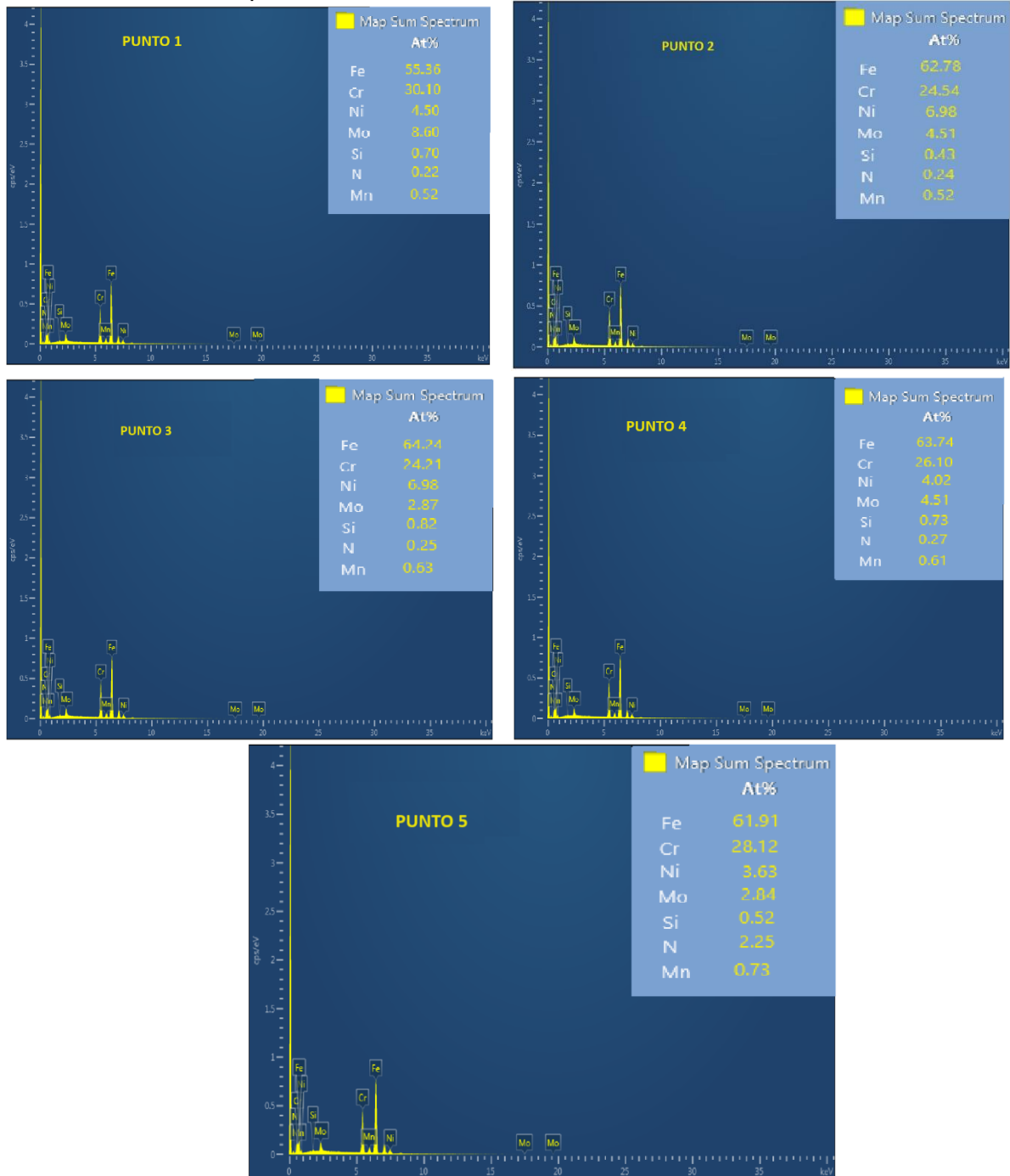
Imagen SEM del acero inoxidable sin tratamiento



Nota: Imagen obtenidas del microscopio electrónico de barrido. Fuente: Laboratorio de la facultad de ciencias

Figura 42

Análisis EDS de los 5 puntos



Nota: Análisis de elementos de cada fase detectada. Fuente: Laboratorio de la facultad de ciencias

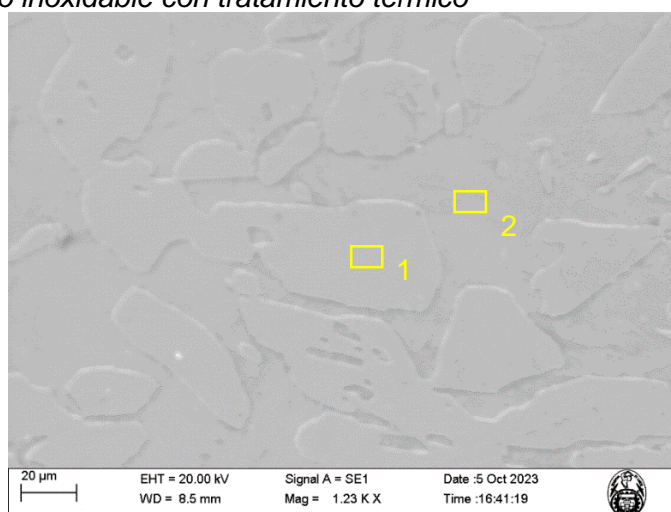
El punto 1 es la fase sigma porque tiene un porcentaje de cromo y molibdeno alto, el punto 2 es la fase chi debido a que se encuentra en la interfase de la fase ferrítica y austenítica y tiene una composición elevada de cromo y molibdeno, el punto 3 es la fase austenítica, el punto 4 es la fase ferrítica por su elevado contenido de cromo y bajo

contenido de níquel y finalmente el punto 5 es la fase secundaria de Cr₂N debido a su alto contenido de Nitrógeno y la forma de aguja que se tiene.

El análisis de la segunda muestra que es con tratamiento térmico, solamente se identificó dos fases (ver Figura 43) y se realizó su respectivo análisis EDS en esos dos puntos para saber su composición química (ver Figura 44).

Figura 43

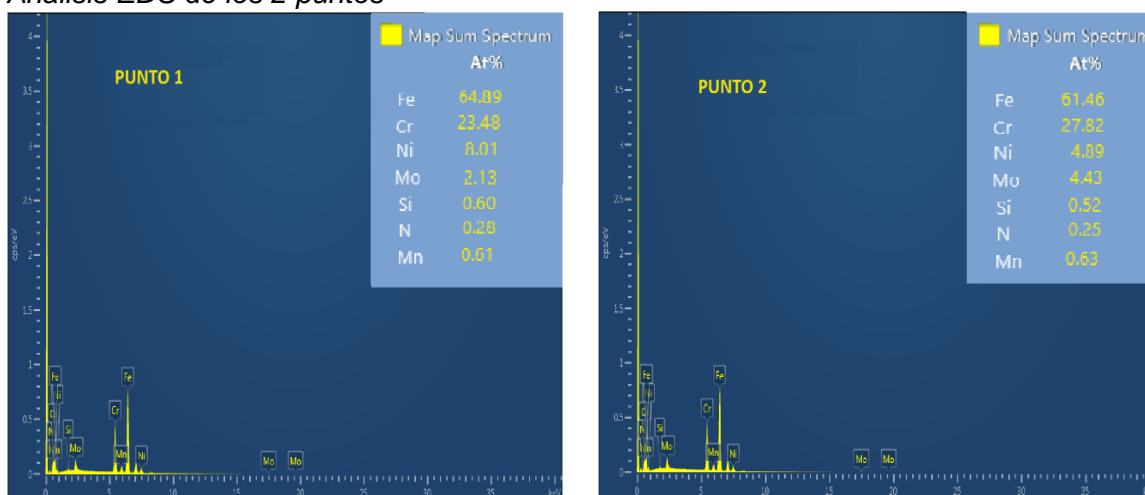
Imagen SEM acero inoxidable con tratamiento térmico



Nota: Imágenes obtenidas del microscopio electrónico de barrido. Fuente: Laboratorio de la facultad de ciencias

Figura 44

Análisis EDS de los 2 puntos



Nota: Análisis de elementos de las fases ferrítica y austenítica. Fuente: Laboratorio de la facultad de ciencias

En la figura 44 nos muestra el análisis EDS de las dos fases principales del acero inoxidable super dúplex con tratamiento térmico, la primera la fase austenítica y la segunda la fase ferrítica.

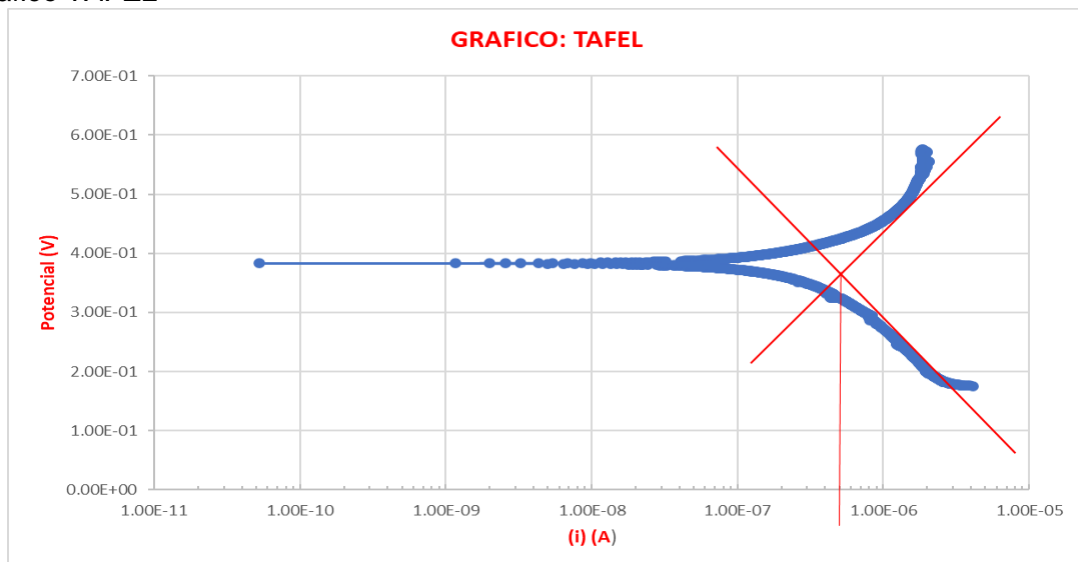
4.6 Pruebas de corrosión

4.6.1 Cálculo de velocidad de corrosión y pérdida de masa

La prueba de corrosión realizada por el potenciostato se obtuvo valores tanto de sobrepotencial de un electrodo y la velocidad de reacción química. Estos valores se graficaron y se trazaron dos pendientes tanto de la corriente anódica y catódica que se intersecan en un punto, esta intersección de pendientes nos dio la corriente de corrosión neta, como se muestra en la Figura 45:

Figura 45

Gráfico TAFEL



Nota: grafica de los valores obtenidos del potenciostato. Elaboración propia

Según el gráfico se obtiene una la corriente de corrosión neta que tiene un valor de $4 \cdot 10^{-7} = 0.4 \mu\text{A}$, una vez obtenido este valor se calcula la densidad de corriente de corrosión, usando la ecuación (5)

$$i_{cor} = \frac{0.4}{0.74 * \frac{\pi}{4}} = 0.688 \frac{\mu\text{A}}{\text{cm}^2}$$

Adicionalmente al valor anterior se necesita calcular el peso equivalente de la aleación, para eso se necesita los valores de la Tabla 12:

Tabla 12*Porcentajes de composición, valor de valencias peso atómico*

Elemento	%	valor de valencias	peso atómico
Cr	25.50	3	51.996
Ni	6.10	2	58.71
Mo	4.00	3	95.94
N	0.28	3	14.0067
Fe	64.12	2	55.847

Nota: Elaboración propia

$$Q = \frac{25.5}{51.996}x3 + \frac{6.1}{58.71}x2 + \frac{4.0}{95.95}x3 + \frac{0.28}{14.0067}x3 + \frac{64.12}{55.874}x2$$

$$Q = 4.15 \text{ g equivalentes}$$

Por lo tanto, el peso equivalente de la aleación es $100/4.15=24.096$

Ahora, calculando la velocidad de corrosión y la pérdida de masa:

$$\text{velocidad de corrosion} = \frac{3.27 * 10^{-3} * 0.688 * 24.096}{8.03} = 0.0067 \text{ mm/año}$$

$$\text{perdida de masa} = 8.954 * 10^{-3} * 0.688 * 24.096 = 0.148 \frac{\text{g}}{\text{m}^2\text{d}} = 1.48 \text{ mdd}$$

4.6.2 Cálculo del número equivalente de resistencia a las picaduras (PREN)

Para el cálculo de PREN se necesita los porcentajes de los valores de cromo, molibdeno y nitrógeno en la aleación, estos son reemplazados en la ecuación (4).

$$PREN = 25.7 + 3.3 * 4.1 + 16 * 0.27 = 43.55$$

Este valor obtenido hace que el metal fabricado se clasifique en acero inoxidable super dúplex.

Conclusiones

La fabricación del acero inoxidable super dúplex por el método usado en la empresa Metalurgia el Fierro y el cobre SAC se dio con éxito, por la serie de análisis y estudios que se realizó en todos los procesos, con el objetivo de garantizar y obtener excelentes propiedades Mecánicas y de Corrosión.

La fundición del acero inoxidable super dúplex en un horno de Inducción se logró sin ningún problema, siendo la composición química vital en este proceso, cumpla los rangos de la norma ASTM A890 grado 5A.

La composición química determina el porcentaje de las fases ferrítica y austenítica, para calcular el porcentaje de estas fases se usa las fórmulas de cromo y níquel equivalentes, estos valores con contrastados con los valores obtenidos gracias al programa Imagen J.

El tratamiento térmico a una temperatura de 1120°C y el enfriamiento rápido en el agua ayudó a que no se forme fases secundarias perjudiciales, esto se comprobó gracias a la microscopia electrónica de barrido.

El reactivo Beraha's usado en el acero inoxidable super dúplex identificó las fases ferríticas y la austenítica. Este coloreó la fase ferrítica y no la fase austenítica, esto se aprecia con el microscopio óptico.

Se encontraron las fases dañinas como la sigma y la Chi, esto fue gracias al microscopio electrónico de barrido (SEM) y la metodología EDS que nos permitió el análisis químico puntual de cada fase presente en las imágenes SEM.

Los resultados de la prueba de tracción cumplen están dentro de los parámetros de la ASTM A 890, en donde el valor de la fuerza de fluencia es de 70.42 kN, la fuerza máxima es 89.34 kN, esfuerzo de Fluencia es 538.41 MPa, esfuerzo máximo 683.04 MPa y Elongación de 36.51 %.

Los resultados de la prueba de Charpy cumplen con los requisitos mínimos trazados bajo las normas ASTM A 923. El valor mínimo que piden es de 40 J, el valor de la prueba realizada es de 122 J, lo cual determino que fue el proceso seguido es adecuado en la fabricación de aceros inoxidable super dúplex debido a que no presenta fases secundarias.

El resultado de la prueba de corrosión da un valor de pérdida de masa de 1.48 mg/dm².dia. Este valor es la décima parte del valor máximo permisible según norma ASTM A 923. Este resultado nos indica que se ha seguido un buen proceso de fabricación y que tendrá una larga duración.

Recomendaciones

Para futuros trabajos de tesis o investigación se recomienda el uso de otros elementos aleantes como el Wolframio, Vanadio, Niobio y Titanio para modificar y mejorar las propiedades mecánicas y de corrosión del acero inoxidable super dúplex ASTM A 890 grado 5A.

Contar con los certificados de calidad de la materia prima a utilizar, para garantizar que ningún componente este fuera de rango y ocasione que el metal se contaminara o que un componente salga de rango en especial el carbón.

Realizar más pruebas de corrosión del acero inoxidable super dúplex en distintos tipos de ácidos y a diferentes temperaturas que son utilizados en la minería y en la industria peruana, para fomentar la producción de este material.

Cuando se realice la fundición del acero inoxidable super dúplex uno de los parámetros que debe tener es que se funda en un rango de temperatura de 1570 a 1590° C dependiendo del espesor y la geometría de la pieza.

Realizar pruebas de soldadura en el acero inoxidable super dúplex para determinar su influencia en la microestructura de la zona afectada por el calor.

Referencias Bibliográficas

- ASTM International (2019). ASTM A 802. Práctica estándar para piezas fundidas de acero, normas de aceptación de superficies, examen visual. Obtenido de <https://www.astm.org/a0802-19.html>
- ASTM International (2018). ASTM A 890/A 890M-99. Especificación estándar para fundiciones, hierro-cromo-níquel-molibdeno resistentes a la corrosión, dúplex (austenítico/ferrítico) para aplicaciones generales. Obtenido de https://www.astm.org/a0890_a0890m-18a.html
- ASTM International (2022). ASTM A 923. Métodos de prueba estándar para detectar la fase intermetálica perjudicial en aceros inoxidable austeníticos/ferríticos dúplex. Obtenido de <https://www.astm.org/a0923-22.html>
- ASTM International (2020). ASTM A 995. Especificaciones estándar para fundiciones de acero inoxidable austenítico-ferrítico (dúplex), para piezas que contienen presión. Obtenido de https://www.astm.org/a0995_a0995m-20.html
- ASTM International (2017). ASTM E 3. Guía estándar para la preparación de muestras metalográficas. Obtenido de <https://www.astm.org/e0003-11r17.html>
- ASTM International (2018). ASTM E 10. Método de prueba estándar para la dureza Brinell de materiales metálicos. Obtenido de <https://www.astm.org/e0010-18.html>
- ASTM International (2018). ASTM E 165. Práctica estándar para pruebas de líquidos penetrantes para la industria general. Obtenido de https://www.astm.org/e0165_e0165m-18.html
- ASTM International (2023). ASTM E 407 Práctica estándar para micrograbado de metales y aleaciones. Obtenido de <https://www.astm.org/e0407-07r15e01.html>
- ASTM International (2021). ASTM E 415 Método de prueba estándar para el análisis de acero al carbono y de baja aleación mediante espectrometría de emisión atómica por chispa. Obtenido de <https://www.astm.org/e0415-21.html>

- ASTM International (2019). ASTM E 1508 Guía estándar para análisis cuantitativo mediante espectroscopia de energía dispersiva. Obtenido de <https://www.astm.org/e1508-12ar19.html>
- ASTM International (2023). ASTM G 102. Práctica estándar para el cálculo de tasas de corrosión e información relacionada de mediciones electroquímicas. Obtenido de <https://www.astm.org/g0102-89r15e01.html>
- Bejarano, J. A. y Núñez, R. M. (2019). *Evaluación de la Influencia de los Gases de Protección de Soldadura en las Propiedades del Acero Inoxidable UNS S32707* [Tesis Doctoral, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/14223>
- Colpaert, H. (2018). *Metallography of Steels: Interpretation of Structure and the Effects of Processing* (A.L.V. da Costa e Silva, Trans.).ASM International. (Obra original publicada en 2008)
- Delgado, G. L. (2016). *Diagnóstico de las propiedades de los aceros por microscopía óptica*. [Tesis de grado, Universidad distrital Francisco José de Caldas]. <http://hdl.handle.net/11349/4152>.
- Dionicio, R. y Tovar, J. (2018). *Producción de acero en horno de inducción en Aceros del Perú SAC*. [Tesis de grado, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. <http://repositorio.unifsc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14067/3496/DIONICIO%20CHINCHAY%20y%20TOVAR%20FIGUEROA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gradwell, K., Chance, J. & Coop, W. (1981). *Thick Section Castings for the Pump Industry in 25 Chromium--5 Nickel Duplex Stainless Steels. Materials of Construction of Fluid Machinery and Their Relationship to Design and Performance*, pp. 49-64.
- Guerra, P.C. (setiembre de 1999). Boletín técnico de Aceros Dúplex. *FASTPACK: Piping Products*.

- Gunn, R. (1997). *Aceros inoxidables dúplex: microestructura, propiedades y aplicaciones*. Editorial Woodhead.
- Hernández Rodríguez, L. V. & Romero Muñoz, D. A. (2016) *Análisis Microestructural de los Aceros Inoxidables AISI 316, 420 Y 430 Utilizando la Técnica de Metalografía a Color*. [Tesis de grado, Universidad distrital Francisco José de Caldas]. <http://hdl.handle.net/11349/4152>
- International Molybdeno Association. (2012). *Directrices Prácticas para la Fabricación de los Aceros Inoxidables Dúplex*. Londres: IMO. https://www.imoa.info/download_files/stainlesssteel/Duplex_Stainless_Steel_Spanish.pdf
- Lorezana, A. (2018). *Diseño de Alimentadora de Materia Prima Automatizada para Hornos de Inducción*. [Tesis de grado, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutierrez]. <http://repositorio.digital.tuxtla.tecnm.mx/xmlui/handle/123456789/2012>
- Martins, M. y Casteletti, LC (2009). *Características microestructurales y comportamiento frente a la corrosión de una fundición de acero inoxidable súper dúplex*. *Caracterización de materiales*, 60 (2), 150-155.
- McGuire, M. F. (2008). *Stainless steels for design engineers*. ASM International.
- Ribeiro de Oliveira, C.; Martins, M. y Roberto Mei, P. (2015). *Caracterização microestrutural e mecânica de juntas soldadas em aços inoxidáveis superduplex da norma astm a890/a890m, graus 5A e 6A*. 12º Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável - parceria ABINOX, Rio de Janeiro - Brasil, p. 14-24. <http://dx.doi.org/10.5151/12abinnox-2626>
- Schweitzer P. (2007). *Fundamentals of Metallic Corrosion*. Taylor and Francis Group, LLC.
- Shamanth, V., Ravishankar, K. S., & Hemanth, K. (2019). *Duplex Stainless Steels: Effect of Reversion Heat Treatment*. In (Ed.), *Stainless Steels and Alloys*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80007>

Thermo Fisher Scientific Inc (2023). *Espectroscopia de dispersión de energía:*
Espectroscopia de dispersión de energía.

<https://www.thermofisher.com/pe/en/home/materials-science/eds-technology.html>