



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN



INGENIERIA MECANICA

“Algunos casos prácticos donde se usa el acero inoxidable dúplex”

T E S I S

Que para obtener el título de:

Ingeniero Mecánico

Presentan:

Gómez Alvarez Jeremy Rafael.

Trejo Serrano Isaías.

Asesor: Dr. Daniel Aldama Avalos.

Nezahualcóyotl, Edo. de México 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

El camino al buen término de este trabajo fue complejo y lleno de obstáculos, mismos que no hubiéramos podido superar sin un gran esfuerzo de nuestra parte. Pero sobre todo el apoyo de nuestras familias y seres queridos con quienes siempre hemos contado incondicionalmente.

Es por eso que les agradecemos principalmente a, nuestros padres y hermanos por su cariño y comprensión, por todo su tiempo, consejos y buenos deseos; a nuestros amigos y allegados por su apoyo y motivación en momentos difíciles; a nuestro asesor por su comprensión, y guía a lo largo de todo este proceso, pero sobre todo a Dios que nos dio fuerza y paciencia para poder concluir este trabajo.

Y por último, aunque no menos importante agradecemos a nuestra casa de estudios Fes Aragón UNAM por las oportunidades los conocimientos experiencias y el sin fin de vivencias que hoy marcan nuestras vidas.

Isaías Trejo serrano y Jeremy Gómez Alvarez

Índice

AGRADECIMIENTOS.....	2
Relación de cuadros y gráficas.....	7
Introducción	9
Capítulo I Comercialización y manufactura del acero inoxidable.....	10
1.1 Comercialización del acero en el mundo.....	10
1.1.1 Principales empresas productoras a nivel mundial.....	11
1.1.2 Dinámica del mercado internacional	12
1.1.3 Comercialización en México	12
1.2. Principales productores en México.....	12
1.2.1 Evolución del sector acerero.....	13
1.2.2 Consumo Nacional Aparente.....	14
1.3. Clasificación de los aceros	14
1.3.1 Diagrama de equilibrio hierro carbono.....	14
1.3.2 Aceros aleados.....	16
1.3.3 Metales a altas y bajas temperaturas.....	16
1.3.3.4 Metales a altas temperaturas.....	16
1.3.3.5 Metales a bajas temperaturas.....	17
1.3.3.6 Aceros para herramientas	18
1.3.3.7 Aceros según la clasificación SAE-AISI.....	18
1.4 Aceros inoxidables	19
1.4.1 Principales elementos de aleación en los aceros inoxidables.....	19
1.4.2 Efectos de los elementos de aleación en los aceros Inoxidables.....	22

1.4.3 Composición de los aceros inoxidable.....	25
1.4.4 Aceros inoxidable martensíticos	26
1.4.5 Aceros inoxidable ferríticos	26
1.4.6 Aceros inoxidable austeníticos.....	27
1.4.7 Aceros inoxidable endurecibles por precipitación.	29
1.4.8 Aceros inoxidable dúplex.....	30
1.5 Características generales de los aceros inoxidable más comunes.....	31
1.6 Fase sigma	33
1.7 Fabricación y Producción del Acero Inoxidable	35
1.7.1 Fabricación en horno eléctrico	36
1.7.2 Fase de fusión	36
1.7.3 Fase de afino	36
1.7.4 Flujos de materia en el proceso de fabricación del acero	37
1.8 Mecanizado de aceros inoxidable	37
1.9 Aceros Inoxidable Comerciales	38
1.10 Productos del Acero Inoxidable	39
1.10.1 Producto largo (alambre) de acero inoxidable.....	39
Capítulo II Resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable	40
2.1 Corrosión de los metales.....	40
2.1.1 Tipos específicos de corrosión	42
2.1.2 Métodos para combatir la corrosión	45
2.1.3.1 Corrosión por erosión	45
2.1.3.2 Corrosión bajo tensión.....	45
2.1.3.3 Corrosión por hidrogeno.....	46
2.1.3.4 Corrosión intercrystalina	47

2.1.3.5 Corrosión por fricción	47
2.1.3.6 Fatiga con corrosión	48
2.1.3.7 Corrosión por aireación diferencial	49
2.2 Prevención de la corrosión	49
2.3 Características importantes que separan al acero inoxidable de los otros aceros.....	50
2.4 Oxidación.....	50
2.4.1 Oxidación del cromo	52
2.4.2 Oxidación de los aceros inoxidables	52
2.4.3 Influencia de la temperatura	53
2.4.4 Composición de la capa de óxido que se forma sobre la superficie de los aceros a elevadas temperaturas.....	53
Capítulo III Los aceros dúplex y algunos casos prácticos	54
3. Clasificación de los aceros dúplex.....	54
3.1 Normatividad para los aceros dúplex UNS	56
3.2 Características mecánicas de los aceros dúplex	58
3.3 Problemas de Corrosión.....	63
3.4 Los aceros inoxidables dúplex y su resistencia en el agua de mar.	63
3.5 Resistencia a la corrosión de los acero inoxidable dúplex para su aplicación en concretos reforzados.	64
3.6 Resistencia del acero inoxidable dúplex en grietas por corrosión en contenedores de agua con cloruro.	65
3.7 Rendimiento de los aceros inoxidables dúplex en ácidos orgánicos	65
3.8 Corrosión en digestores de pulpa kraft.....	67
3.9 Efectos de la fase sigma en picaduras por corrosión.....	67
3.10 La influencia del cobre en el acero inoxidable dúplex en las picaduras por corrosión en ambientes salinos y ácidos.....	68
3.11 Grietas ocasionadas por esfuerzos en medios que tienen cloruro.	69

3.12 Servicios y aplicaciones de los aceros inoxidables dúplex en la industria del Petróleo y gas.....	69
3.12.1 Arquitectura utilizando aceros dúplex.....	70
3.13 Los aceros inoxidables dúplex para uso en tuberías y recipientes de producción.....	72
3.13.1 Comportamiento de un acero inoxidable dúplex de grado 25 Cr a elevada temperatura.....	73
3.14 Métodos de soldadura aplicable	75
3.14.1 Soldabilidad de los aceros dúplex	75
3.14.2 Soldadura de un acero inoxidable dúplex 2205 por el proceso de soldadura GTAW o TIG.....	76
3.14.3 Parámetros de soldadura considerados en el caso práctico	78
3.14.4 Ensayos mecánicos que muestra el caso práctico.....	78
3.14.5 Ensayos no destructivos del caso práctico.....	80
3.15 Tratamiento térmico después de la soldadura.....	81
3.16 Estudios de caso en análisis de fallas de ingeniería.....	82
Conclusiones y recomendaciones	85
Conclusiones.....	85
Recomendaciones	85
Anexos.....	87
Referencias Bibliográficas.....	89

Relación de cuadros y gráficas.

Grafica 1: Produccion de acero en el mundo	10
Grafica 2: Principales países productores de acero en (2011)	11
Tabla 1: Tabla 1: Principales empresas acereras (Millones de toneladas métricas y porcentajes).....	11
Grafica 3: Producción de las 5 principales empresas acereras del país.	13
Gráfica 4: Producción por tipo de producto, (2011)	14
Diagrama 1 Equilibrio hierro carburo de hierro.....	15
Diagrama 2: Influencia que ejerce sobre la resistencia en los aceros enfriados en aire.....	17
Diagrama 3: Resistencia tensil	18
Diagramas 4 (a, b, c, d) Hierro-Cromo con porcentaje de Carbono.....	20
Diagramas: 5 (a, b): Influencia del Cromo y el Níquel en los aceros inoxidables.....	22
Tabla 2: Composición química de metales que se utilizan para soldadura.....	24
Figura 1 Fase sigma en un acero X20Cr Ni 25-20.....	33
Diagrama 6:Fase sigma	34
Diagrama 7: Diagrama de Schaeffler	34
Figura 2: Ilustra la formación de iones en el ánodo, y de hidrógeno en el cátodo en una celda de acción local.....	41
Tabla 3: Serie galvánica de metales y aleaciones en agua de mar.	44
Figura 3: Corrosión por erosión	45
Figura 4: Corrosión bajo tensión.....	46
Figura 5: Corrosión por hidrogeno.....	47
Figura 6: Corrosión por fatiga, fisura perpendicular a la superficie, en la cara exterior de un tubo de acero.	48
Tabla 4: Porcentaje de composición química de algunos aceros dúplex de la serie UNS	55
Diagrama 8 Fases del acero inoxidable dúplex.....	58
Diagrama 9 Esfuerzo deformación entre el acero del tipo súper dúplex, dúplex e inoxidable.	59
Tabla 5 Límites de propiedades mecánicas ASTM para chapa de acero inoxidable duplex	59
Diagrama : 10 Comparación de límites elásticos de acero inoxidable duplex EN 1.4404 (AISI 316 L) entre temperatura ambiente y 300°C (572°F).....	60
Tabla 6 Comparacion de la ductilidad de acero inoxidable duplex y austeniticos con los requisitos de ASTM A 240 y EN 10088-2	61
Diagrama 11 Comparación de la recuperación elástica de los aceros duplex tipo EN 1.4404 (AISI 316L) en chapa de 2mm (0.08 pulgadas) de espesor.	61
Figura 7: Muestra micrografías tanto de aleaciones dúplex y austenítica.....	62

Tabla: 7 Resistencia a la corrosión por picadura en diferentes tipos de aceros inoxidables dúplex	64
Tabla 9 Resultados de pruebas electro químicas	67
Figura8 Tubos umbilicales para aplicaciones de gas y petróleo offshore	70
Figura 9: Puente Stonecutters, Hong Kong	70
Figura 10: La Hélix, Singapur, con una estructura resistente de acero dúplex (2205).	71
Figura11: Aeropuerto Internacional de New Doha con tejado de acero inoxidable dúplex.	72
Tabla 10: Condiciones de soldadura y calor	79
Tabla 11: Valores promedio de dureza Vickers (HV) con 30 kgf	79
Figura12: Disposición de la probeta Charpy en el cupón de soldadura.	79
Tabla: 12 Valores promedios de energía absorbida con una carga de 300 J. aportado para cada pase de cordón	80
Figura 13 Inspección visual del cordón de soldadura	81
Figura 14: Estructura esquemática y grieta entre la boquilla y el calor para el reactor con	83
Figura 15 Estructura de soldadura entre la boquilla.....	83
Figura 16 fractura de soldadura.....	84

Introducción

En este trabajo se maneja una comprobación de la superioridad del acero inoxidable dúplex en comparación con los otros tipos de aceros inoxidables, así como las ventajas y desventajas, que presentan dichos aceros y su respuesta al interactuar con el medio ambiente o algunas sustancias corrosivas como ácidos y materiales alcalinos.

En el capítulo I se describe una breve reseña de la comercialización del acero en México y el mundo, destacando las principales empresas productoras de lo mismo, además de observar su consumo y evolución.

De igual forma se indica la clasificación de los aceros al carbón e inoxidables que manejan las normas, AISI (American Iron and Steel Institute) y SAE (Society of Automotive Engineers), para satisfacer las necesidades de la industria. Como último punto del primer capítulo se menciona las formas de fabricación y producción del acero inoxidable, con la mención de algunos aceros inoxidables comerciales.

En el capítulo II se hace alusión nuevamente al proceso de corrosión, esta vez de una manera más amplia; en el entendido de que la oxidación es el proceso electroquímico que sufre el metal a una temperatura ambiente, mientras que la corrosión sólo se da bajo un cambio de temperatura ya sea alta o baja. Basándonos en el libro de “La introducción a la metalurgia física” de Avner, donde encontramos algunos tipos e específicos de corrosión, así como algunos métodos para combatir este fenómeno. Otro punto a resaltar en este capítulo es la oxidación en los aceros inoxidables, ya que estos también presentan este fenómeno electroquímico, cabe destacar que en este proceso la influencia de la temperatura a la que está expuesto este material es de suma importancia.

Capítulo III podemos observar en esta parte una descripción más detallada de los aceros inoxidables dúplex, y su clasificación con base en la norma Unified Numbering System (UNS), lo cual se obtuvo de las memorias de la (World Conference Stainless Steels). Se analizó y describió las características mecánicas de los aceros inoxidables dúplex, tales como esfuerzos de deformación, tensión, ductilidad y límite elástico. En donde se observan características superiores a los otros aceros inoxidables. Profundizando en esto, se mencionan y describen algunos casos prácticos que explican cómo actúan estos materiales, en distintos ambientes y situaciones; finalmente, se hace mención de un estudio de caso en análisis de fallas de ingeniería el cual fue desarrollado por el ingeniero Hugo Cárdenas Gutiérrez en su examen profesional, en este, él hace resaltar la importancia de una técnica eficaz en el proceso de soldadura de un acero dúplex. El cual de no realizarse de una manera adecuada puede llegar a perder sus propiedades, al verse expuesto a las altas temperaturas que presenta este proceso.

Capítulo I

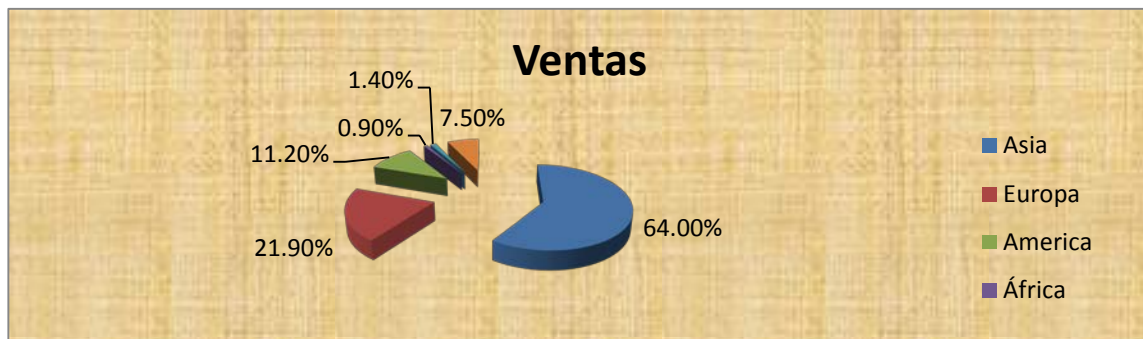
Comercialización y manufactura del acero inoxidable.

El acero en su producción mundial y nacional es un material altamente comercializable en todas sus presentaciones, México compite en su producción con las grandes compañías internacionales y los países más desarrollados en tecnología. Nunca ha sido un camino sencillo ya que es un país tercermundista: pero el trabajo continúa esperando cada vez mejores resultados en los mercados nacionales y por supuesto el internacional. La comercialización y producción del acero inoxidable está dominado por las mismas empresas transnacionales que fabrican el acero al carbono. Así el acero inoxidable guarda características impresionantes en su elaboración y producción cuando nos referimos a un gran número de productos; tiene características como, conservación de su brillo, una dureza superior a muchos otros aceros, y sobre todo tienen alta capacidad para enfrentar los fenómenos de oxidación y corrosión, tan comunes en muchos otros materiales.

1.1 Comercialización del acero en el mundo

La Secretaría de Economía en su división “Industria Metalmeccánica”, señala que el mercado del acero se caracteriza por estar altamente globalizado. La estructura del mercado mundial en 2010 es la siguiente: Asia concentra el 64% del total y le siguen Europa con el 21.9% y América con el 11.2%, los primeros 15 países productores a nivel mundial 5 de Asia, 7 de Europa (incluye Rusia, Ucrania y Turquía) y 3 de América (2 de América Latina -México y Brasil). México ocupa la posición 13 dentro del grupo de los principales productores de acero.

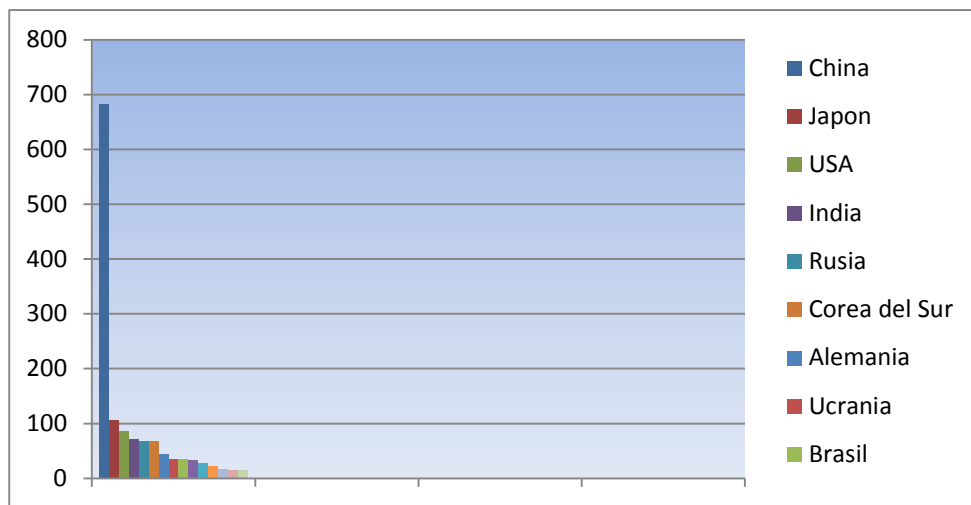
**Grafica 1:
Produccion de acero en el mundo**



Fuente: (2012) World Steel Association

De los quince países referidos tenemos que ellos concentran el 89.7% del valor total; China representó el 45.9 %, los otros 14 países el 43.8% y el resto de los productores mundiales aportan el 10.3%.

**Grafica 2:
Principales países productores de acero en (2011)**



Fuente: (2012) World Steel Association

China ocupa el primer lugar muy por encima de los otros Países, por lo que podemos decir que la mayor cantidad de acero en el mundo es de origen chino.

1.1.1 Principales empresas productoras a nivel mundial

La Secretaría de Economía da a conocer que el 24.5% de la producción mundial de acero se produce en las 10 empresas más grandes del mundo. Arcelor Mittal, la empresa acerera más grande a nivel mundial, registró en 2010 una producción de 98.2 millones de toneladas métricas, equivalente al 6.9 por ciento de la producción global; le siguen Baosteel de China (2.6%); Posco, de Corea del Sur (2.5%); Nippon Steel de Japón (2.5%); JFE Holdings de Japón con 2.2% y, Jiangsu Shagang, de China con 1.6%. En la tabla 1 se puede ver la producción de las empresas acereras.

**Tabla 1:
Principales empresas acereras (Millones de toneladas métricas y porcentajes)**

No.	Empresa	País de Origen	Producción mundial	% del mercado
1	ArcelorMittal	Multinacional	98.2	6.9
2	Baosteel	China	37.0	2.6
3	POSCO	Corea del Sur	35.4	2.5
4	Nippon Steel2	Japón	35.0	2.5
5	JFE	Japón	31.1	2.2
6	Jiangsu Shangang	China	23.2	1.6
7	Tata Steel3	India	23.2	1.6
8	U.S. Steel	Estado Unidos	22.3	1.6
9	Ansteel4	China	22.1	1.6
10	Gerdau	Brasil	18.7	1.3
Total			1413.6	100.0

Fuente: (2012) World Steel Association

1.1.2 Dinámica del mercado internacional

La producción mundial de acero aumentó en 75.5% entre 2000 y 2011; en este comportamiento destaca el avance de los países asiáticos, como ya lo señalamos, las economías más dinámicas fueron China, India y Turquía con crecimientos de 431.7, 168.4 y 138.5, millones de toneladas respectivamente.

Datos de la dirección de la industria metalmecánica indican que, Europa, contribuyó con el 5.7% del crecimiento promedio, tuvo un comportamiento errático: los países que aumentaron su producción fueron Turquía, 138.5%; Rusia, 16.5%; Ucrania, 11.1%. En cambio, se observaron retrocesos en Francia, con 24.9%; Alemania, con 4.6%; Japón, con 15.3%; y España, con 1.9%.

De acuerdo con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), se esperaba que la producción mundial de acero creciera en alrededor de 16% en 2012, con el liderazgo de la producción de China. Asimismo, se esperaba que la dinámica de la industria manufacturera fuera la clave del crecimiento en muchos países, principalmente en industrias como la automotriz, de maquinaria y productos metálicos (acero, aluminio y cobre, por ejemplo); no obstante, se calcula que llevará tiempo superar los niveles máximos alcanzados en los años previos a la crisis, en el caso de la industria de aceros terminados.

1.1.3 Comercialización en México

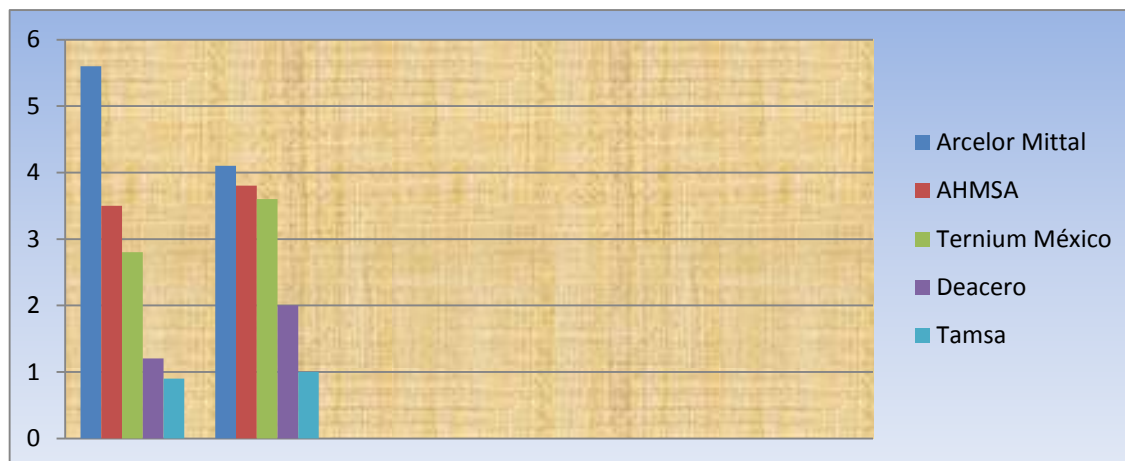
Como se indicó anteriormente, la Secretaría de Economía, en 2011, ubicó a México como el productor de acero número 13 del mundo, con un total de 18.1 millones de toneladas, lo que representó el 1.2% del total de la producción mundial.

1.2. Principales productores en México

El mercado de acero mexicano se encuentra dominado por 5 empresas, las cuales han mantenido una participación estable en la producción de este metal; no obstante, cabe resaltar que Arcelor Mittal perdió seis puntos porcentuales de 2007 a 2010, al pasar de 29.5 a 24%, mientras que sus competidoras AHMSA, Ternium México, DeAcero y Tamsa, mejoraron su posición aumentando en 2 puntos porcentuales al pasar de 20.2 a 21.7%, 18.3 a 19.8%, 12.1 a 14% y 4.6 a 5.1%, respectivamente. El resto de las acerías, en conjunto, no tuvo modificaciones.

Las principales cinco empresas, señaladas, en conjunto concentran el 85% de la producción nacional de acero. El 15% restante de la producción nacional de acero lo realizan otras acerías como ICH, Grupo San Luis, Aceros Corsa y Grupo SIMEC, entre otras.

**Grafica 3:
Producción de las 5 principales empresas acereras del país.**



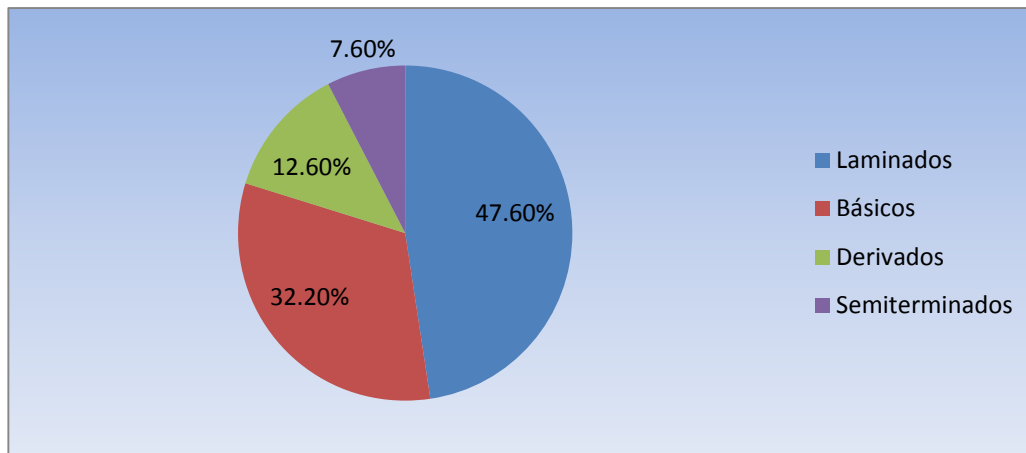
Fuente: World Steel Association/OCDE, (2000-2010)

Las plantas de producción y centros de distribución se concentra en las regiones noreste y centro del país, que incluyen los estados de Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, San Luis Potosí, Jalisco, Guanajuato, Michoacán, Estado de México, Tlaxcala, Puebla y Veracruz; también existe actividad en los estados de Baja California y Yucatán. Así, el 40.6% del territorio nacional está vinculado de manera directa con la industria del acero.

1.2.1 Evolución del sector acerero

La producción nacional de acero aumentó entre 2000 y 2011 en 16.08%. A un c uando e l comportamiento, e n términos de crecimiento, fue oscilatorio, la industria nacional entregó e n promedio durante el mismo periodo, un total de 15.9 millones de toneladas por año. El valor máximo se alcanza en 2011, con 18.1 millones de toneladas, y el más bajo fue en 2001 con 13.3 millones de toneladas. La crisis económica que se dio en 2008 y se agudizó en 2009, indujo una fuerte caída en la producción en ese último año, equivalente al 18.9% con relación al dato reportado el año anterior, y de 20.6% respecto a 2007. No obstante la recuperación de la economía se logró en 2010 y mantiene la tendencia positiva. En 2011, la producción alcanzó la cifra de 18.1 millones de toneladas, nivel superior al reportado en los años 2007 y 2008, lo que representó un crecimiento de 7.1% respecto a 2010, pero superior en 2.8% al máximo histórico de 2007.

Gráfica 4:
Producción por tipo de producto, (2011)



Fuente: CANACERO

En este contexto, también destacan los crecimientos de los productos laminados (planos, largos y tubos sin costura), de 4.5%, y los productos básicos (arrabio y fierro esponja), fue de 3.9%. En sentido inverso, la producción de productos derivados, se redujo en 5.1%.

1.2.2 Consumo Nacional Aparente

El consumo nacional aparente¹ señala la Cámara Nacional del Acero, registró un promedio de 21.5 millones de toneladas a lo largo del periodo 2000-2011. Los valores más altos se registraron en el periodo 2003-2008, cuando logró un promedio de 23.3 millones de toneladas, mientras que en 2011 alcanzó 20.9 millones de toneladas.

1.3. Clasificación de los aceros

Para clasificar el acero se pueden usar varios métodos:

Método de manufactura. Este da lugar al acero Bessemer, de hogar a bierto, de horno a bierto, horno eléctrico y de crisol, etc.

Uso. Generalmente se refiere al uso final que se le dará al acero, como acero para máquinas, resortes, para calderas, estructural o acero para herramienta.

Composición química. Este indica por medio de un sistema numérico, el contenido aproximado de elementos importantes en el acero.

Las especificaciones para los aceros representan el esfuerzo conjunto de la AISI y de la SAE. En un programa de simplificación destinado a satisfacer las necesidades de acero en las industrias.

1.3.1 Diagrama de equilibrio hierro carbono.

Avner nos dice que el hierro es parte fundamental de algunas de las más importantes aleaciones de la ingeniería.

La temperatura a la que tienen lugar los cambios alotrópicos está influenciada por los elementos de aleación, de los cuales el más importante es el carbono. El diagrama 1 muestra la porción de interés del sistema de aleación hierro-carbono. Esta es la parte entre hierro puro y un compuesto

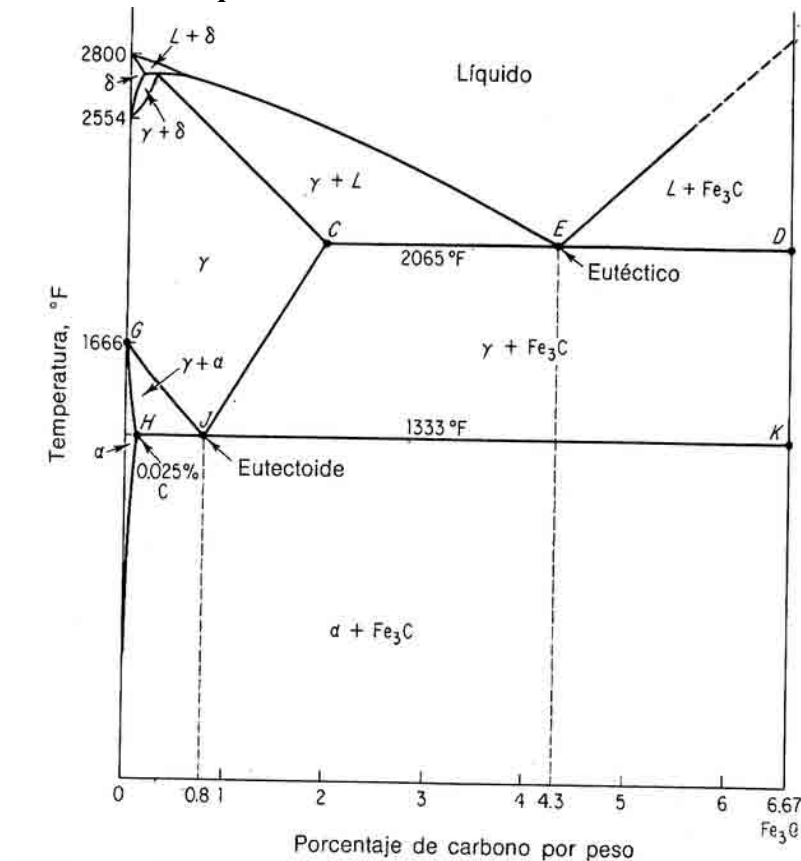
¹ (Que se define según la CANACERO, como la suma de la producción y las importaciones menos las exportaciones)

intersticial, carburo de hierro, Fe_3C , que contiene 6.67% de carbono por peso; por tanto, esta porción se llama diagrama de equilibrio hierro-carburo de hierro. Antes de estudiar este diagrama es importante que el lector entienda que este no es un verdadero diagrama de equilibrio, pues equilibrio implica que no hay cambio de fase en el tiempo; sin embargo, es un hecho que el compuesto carburo de hierro se descompondrá en hierro y carbono (grafito), lo cual tomara un tiempo muy largo a temperatura ambiente, y aun a 1300°F (704.4°C), tarda varios años en formar el grafito. El carburo de hierro se llama fase meta estable; por tanto, el diagrama hierro-carburo de hierro, aunque técnicamente representa condiciones meta estables, puede considerarse como representante de cambios en equilibrio, bajo condiciones de calentamiento y enfriamiento relativamente lentos.

El diagrama muestra tres líneas horizontales que indican reacciones isotérmicas.

En términos generales en el diagrama 1 se ha marcado con letras griegas para representar las soluciones sólidas; sin embargo, es práctica común dar nombres especiales a la mayoría de las fases que aparecen en el diagrama. La solución sólida γ se llama austenita. A continuación se muestra ampliada la porción del diagrama de la esquina superior izquierda. Esta se conoce como región delta debido a la solución sólida δ . El lector debe reconocer la línea horizontal a 2720°F (1493.3°C), por ser una reacción peritectica.

Diagrama 1
Equilibrio hierro carburo de hierro



Fuente: Inchaurrea, (p.31, 1981)

1.3.2 Aceros aleados

Los aceros al carbón son muy recomendables donde la resistencia y otros requisitos no son muy severos Comenta Avner. Estos aceros se usan también con todo éxito a las temperaturas comunes y en atmosferas que no son altamente corrosivas, pero su templeabilidad relativamente baja limita la resistencia que puede obtenerse, excepto en secciones regularmente delgadas.

Un acero aleado puede definirse como aquel cuyas propiedades características se deben a al gún elemento d iferente al carbono. Aunque todos los aceros al carbono contienen moderadas cantidades de manganeso (hasta 0.90%) y silicio (hasta 0.30%) no se consideran aleados, porque la función principal del manganeso y el silicio es actuar como desoxidadores. Ellos se combinan con el oxígeno y con el azufre, para reducir el efecto nocivo de dichos elementos.

El propósito de la aleación menciona, Avner (1966), es añadir a los aceros otros elementos para diversos propósitos, entre los cuales están:

- 1.- Aumentar la templeabilidad
- 2.- Mejorar la resistencia a temperaturas comunes
- 3.- Mejorar las propiedades mecánicas tanto a baja como a altas temperaturas
- 4.- Mejorar la tenacidad a cualquier dureza o resistencia mínima
- 5.- Aumentar la resistencia al desgaste
- 6.- Aumentar la resistencia a la corrosión
- 7.- Mejorar las propiedades magnéticas

Además de los números, las especificaciones AISI pueden incluir un prefijo literal para indicar el proceso de manufactura empleado en la producción del acero. Las especificaciones SAE ahora emplean las mismas designaciones numéricas de cuatro dígitos que las AISI, pero eliminando todos los prefijos literales.

1.3.3 Metales a altas y bajas temperaturas.

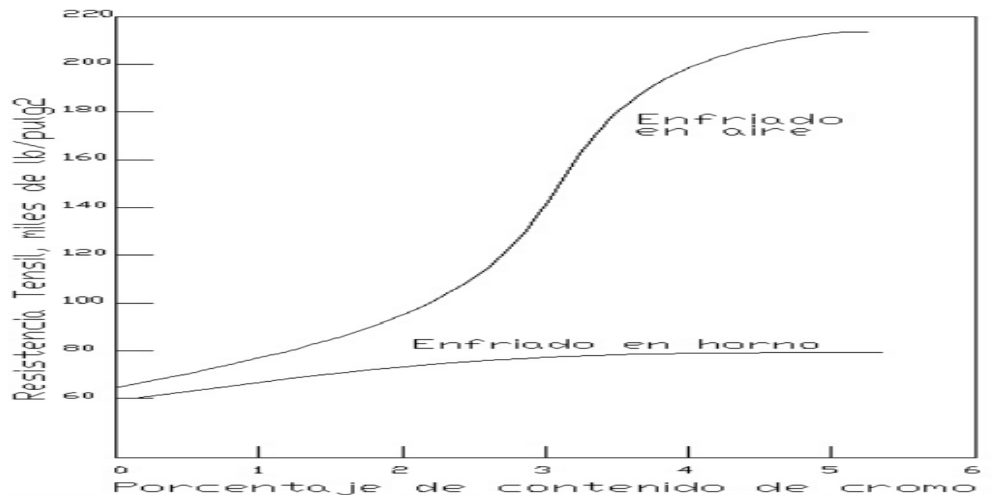
Los términos altas y bajas temperaturas son bastante relativos indica Avner (p.543, 1966), respecto a nuestro propio medio natural lo que se considera como una alta temperatura para un metal con bajo punto de fusión (como el estaño y el plomo) puede considerarse común a baja temperatura para un metal de alto punto de fusión (como el tungsteno). Por tanto los metales con menor punto de fusión exhibirán características a bajas temperaturas que requieren temperaturas relativamente mayores para otros metales; por ejemplo una temperatura aproximada de 538 °C puede ser necesaria para recristalizar hierro después del trabajo en frío, pero el estaño y el plomo recristalizan a temperatura ambiente, de modo que la idea que se tenga con respecto al comportamiento de los metales será en su comportamiento en temperaturas normales. Cuando se cambia la temperatura, llegando a ser mayor o menor, los cambios en el comportamiento de los metales ocurren a menudo y pueden afectar seriamente su aplicación específica.

1.3.3.4 Metales a altas temperaturas.

El comportamiento que los metales presentan al someterlos a esfuerzos con altas temperaturas depende de la duración del periodo de prueba. Como la expectativa de vida de una pieza de maquinaria suele ser alta, no es posible llevar a cabo un ensayo por muchos años para determinar

cómo utilizar en la construcción actual. Es necesario extrapolar basándose en ensayos de tiempos más cortos; sin embargo, esta extrapolación debe hacerse con gran cuidado a partir de pruebas que proporcionan datos útiles. Esto es especialmente difícil para aplicaciones a alta temperatura ya que ocurrirían cambios en el comportamiento conforme transcurra el tiempo a la temperatura de trabajo.

Diagrama 2:
Influencia que ejerce sobre la resistencia en los aceros enfriados en aire.



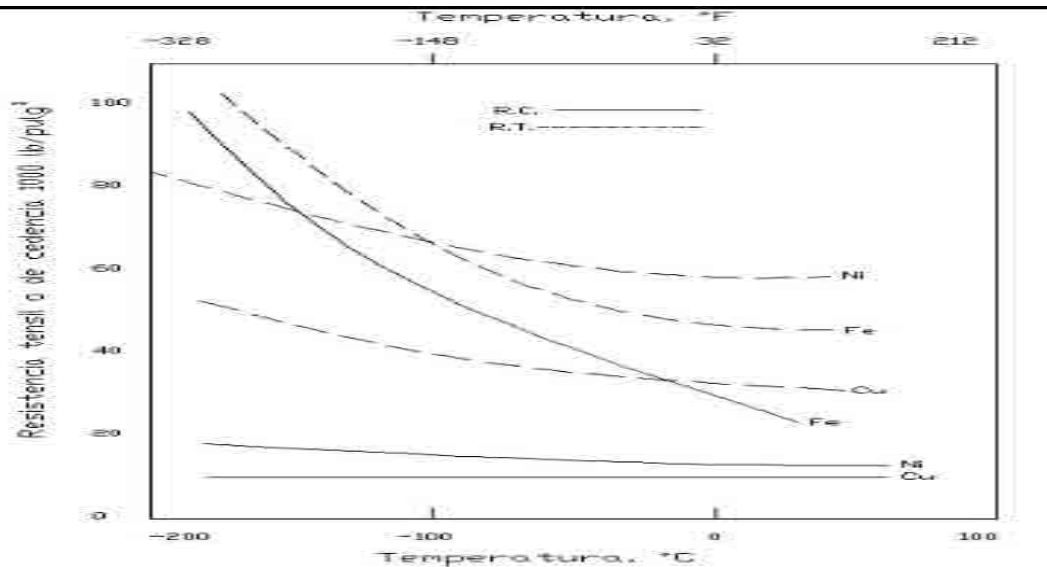
Fuente: Inchaurrea (p. 56, 1961)

En el diagrama 2 podemos observar una comparación entre un acero enfriado con aire, y otro enfriado en horno. Lo que deja ver que al compararlos el acero enfriado al aire tiene una resistencia tensil mayor que el que es enfriado en el horno.

1.3.3.5 Metales a bajas temperaturas.

Efecto de la baja temperatura sobre las propiedades mecánicas. Conforme a la disminución de la temperatura por debajo de la temperatura ambiente normal, aumenta la dureza, la resistencia a la tracción y, con pocas excepciones, la resistencia límite y el módulo de elasticidad de todos los metales y aleaciones. El diagrama siguiente muestra la variación de la resistencia de tracción y tensil de hierro, níquel y cobre con la temperatura.

**Diagrama 3:
Resistencia tensil**



Fuente: Inchaurrea (p. 56, 1961)

Se aprecia en el diagrama 3 la resistencia tensil o cadencia, que se estudió en diferentes metales a bajas temperaturas como Ni, Fe y Cu.

1.3.3.6 Aceros para herramientas

Cualquier acero utilizado como herramienta, menciona Avner (p.384, 1966) puede clasificarse técnicamente como acero para herramientas; sin embargo, el término suele limitarse a aceros especiales de alta calidad utilizados para corte o formado.

Hay varios métodos para clasificar los aceros para herramientas. Uno es según los medios de templado que se utilizan como aceros templados en agua, aceros templados en aceite y aceros templados en aire. El contenido de la aleación es otro medio de clasificación, como aceros al carbono para herramientas, aceros de baja aleación para herramientas y aceros de mediana aleación para herramientas. Un último método de agrupación está basado en el empleo del acero para herramientas, como aceros para trabajo en caliente, aceros resistentes al impacto, aceros de alta velocidad y aceros para trabajo en frío.

1.3.3.7 Aceros según la clasificación SAE-AISI.

Ahora mencionaremos la clasificación que maneja la industria mecánica de USA respecto a los aceros inoxidables. La industria mecánica indica que como la microestructura del acero determina la mayoría de sus propiedades por el tratamiento y la composición química; uno de los sistemas más usados y generalizados es el SAE - AISI ((La norma AISI/SAE presenta una clasificación de aceros y aleaciones de materiales no ferrosos. Es la más común en los Estados Unidos AISI es el acrónimo en inglés de *American Iron and Steel Institute* (Instituto Americano del Hierro y el Acero), mientras que SAE es el acrónimo de *Society of Automotive Engineers* (Sociedad de Ingenieros Automotores)). Los aceros se clasifican con cuatro dígitos XXXX. Los primeros dos números se refieren a los elementos de aleación más importantes y los dos o tres

últimos dígitos dan la cantidad de carbono presente en la aleación. Un acero 1040 A ISI es un acero con 0.4%C; un acero 4340 AISI, es un acero aleado que contiene 0.4%C, el 43 indica la presencia de otros elementos aleantes.

Las convenciones para el primer dígito son:

1 – Manganeso, 2 – Níquel, 3 - Níquel-Cromo, principal aleante el cromo, 4 – Molibdeno, 5 – Cromo, 6 – Cromo-Vanadio, principal aleante el cromo, 8 - Níquel-Cromo-Molibdeno, principal aleante el molibdeno, 9 - Níquel-Cromo-Molibdeno, principal aleante el níquel.

No hay aceros numerados 7xxx porque éstos resistentes al calor, prácticamente, no se fabrican. Se observa entonces que si el primer número es 1 se sabe que es un acero al carbono; si el dígito siguiente es el 0, o sea que la designación es 10xx, se trata de un acero ordinario al carbono.

1.4 Aceros inoxidables

Los aceros inoxidables son aleaciones a base de hierro, cromo, carbono y otros elementos, principalmente, el níquel, el molibdeno, el manganeso, el silicio, el titanio, etc., que les confiere una resistencia particular a algunos tipos de corrosión. Está característica de buena resistencia a la corrosión se debe a la propiedad de estas aleaciones de neutralizarse en un ambiente suficientemente oxidante (por ejemplo, el aire) por medio de la formación de una película superficial de oxígeno absorbido. La película pasiva se vuelve a reconstruir cuando se le daña, naturalmente si el ambiente es suficientemente oxidante y si el oxígeno puede entrar en contacto con la aleación. Dicha película protege el material subyacente del ataque corrosivo

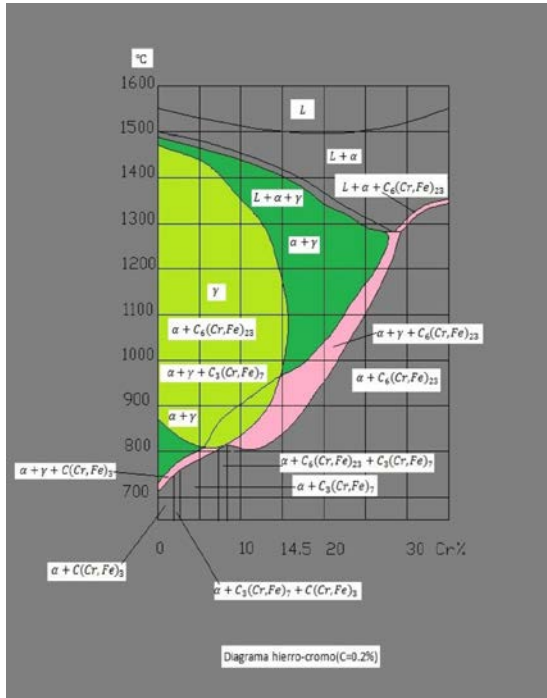
Hablemos un poco más en específico de estos tipos de acero aleados, recordando que los aceros no aleados los ordinarios, son esencialmente aleaciones de hierro-carbono y de aquí partiremos para ver las características que guardan estos aceros inoxidables.

1.4.1 Principales elementos de aleación en los aceros inoxidables

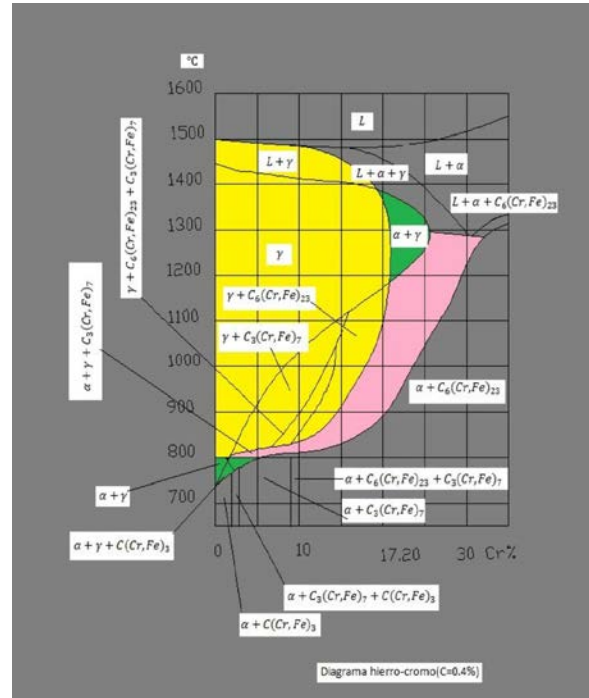
El cromo es un elemento de aleación menos costoso que el níquel y forma carburos simples (Cr_7C_3 , Cr_4C) o carburos complejos ($FeCr_3C$). Estos carburos tienen alta dureza y buena resistencia al desgaste. El cromo es soluble hasta en 13% en hierro gamma y tiene solubilidad ilimitada en ferrita alfa. En los aceros de bajo carbono, el cromo tiende a entrar en la solución, incrementando de esta manera la resistencia y la tenacidad de la ferrita. Cuando el cromo está presente en cantidades que exceden al 5%, las propiedades a altas temperaturas y la resistencia a la corrosión del acero se ven ampliamente mejoradas.

La presencia del cromo aumenta la resistencia al desgaste de la superficie endurecida, pero la tenacidad en la parte interna no es tan alta como en los aceros al níquel.

Aceros al níquel-cromo. En estos aceros, la razón de níquel con respecto al cromo es de aproximadamente $2 \frac{2}{3}$ partes de níquel por una parte de cromo. Una combinación de los elementos de aleación generalmente presenta algunas de las propiedades características de cada uno. El efecto del níquel aumenta la tenacidad y la ductilidad el cual se combina con el efecto del cromo para mejorar la templeabilidad y resistencia al desgaste.



c)



d)

Fuente: Inchaurrea (p.28,1981)

Por lo tanto Inchaurrea menciona que de los diagramas estudiados.

1.- Que se pueden conseguir aleaciones Fe-Cr-C martensíticas con contenidos de Cr entre el 12% y 18 % en cuanto al carbono debe ser más elevado cuanto mayor sea el contenido de Cr. Así, Cr = 13%,

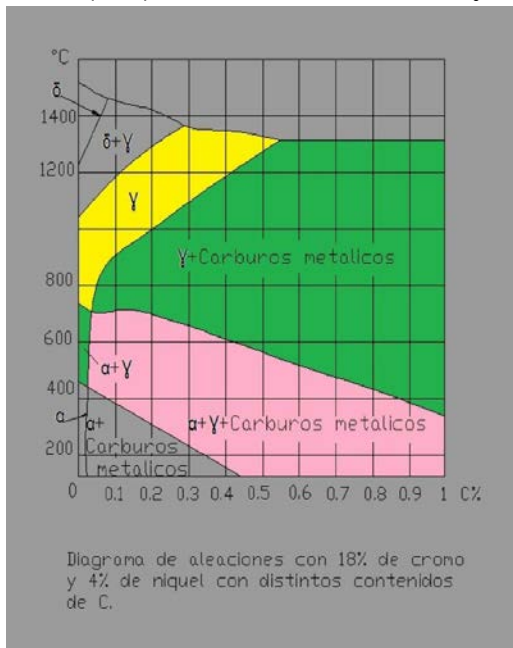
El $C > 0.1\%$ y para Cr = a 18% el C = a 0.6%.

2.- Que se pueden conseguir aleaciones Fe- Cr- C ferríticas con contenidos de Cr entre 16 y 30% y contenido de C bajos, pudiendo aumentar este último al incrementarse el Cr. Así, para Cr = 16% el $C \leq 0.06\%$ y para Cr = 30% el $C < 0.35\%$.

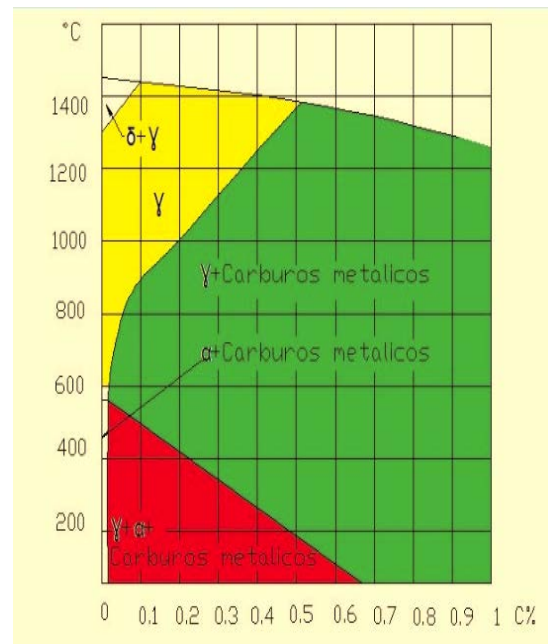
3.- Que jugando con los contenidos de Cr y C se pueden conseguir aleaciones Fe-Cr- C que forman a elevadas temperaturas estructuras bifásicas ($\alpha + \gamma$), y se transforman por enfriamiento rápido en estructuras compuestas de ferrita y martensita (aceros martensíticos- ferríticos)

Diagramas: 5

(a, b): Influencia del Cromo y el Níquel en los aceros inoxidable



a)



b)

Fuente: Inchaurrea (p.29, 1981)

Además Inchaurrea agrega que si observamos los diagramas podemos decir:

- 1.- Que a mayor contenido de Ni el campo de la formación de la fase gamma (γ) aumenta.
- 2.- Que a mayor contenido de Ni el campo de formación de las estructuras bifásicas ($\alpha + \gamma$) disminuye paulatinamente hasta desaparecer para las aleaciones con 8% de Ni.
- 3.- Que en las aleaciones con 8% Ni de la figura (b) sólo es posible la disolución de carburos a altas temperaturas. Más adelante veremos la influencia decisiva de estos carburos en corrosión intergranular.

Inchaurrea menciona que las aleaciones con 17% Cr, 2% Ni y 0.2% C se puede conseguir por calentamiento en la transformación de la fase alfa en la fase gamma se completa y que con enfriamiento rápido se convierte en martensita.

1.4.2 Efectos de los elementos de aleación en los aceros Inoxidables.

Cualquier elemento disuelto en ferrita aumenta su dureza de acuerdo con los principios generales de endurecimiento por solución sólida. El orden de incremento de efectividad en hierro reforzado, basada en condiciones iguales por peso, parece ser como sigue: cromo, tungsteno, vanadio, molibdeno, níquel, manganeso y silicio.

El efecto de endurecimiento de los elementos disueltos es realmente insignificante y también pequeña es la contribución del reforzamiento de la ferrita a la resistencia total del acero.

Evans (p.171, 1997), nos presenta los efectos que tienen algunos elementos sobre las propiedades del acero inoxidable. En primer lugar el Manganeso: La influencia de este elemento en dureza y resistencia de aceros de bajo carbono y soldadura de metales ha sido bien documentada. La influencia numérica es extensible de 0.1% Mn con creciente fuerza de 10 N/mm² es similar a los valores obtenidos por otros trabajos en arco sumergido y CO₂ para soldar metales. Aunque el carbono tiene una influencia mayor, en el manganeso, el rango útil dentro del cual puede ser variado, limita su posible utilidad.

En soldadura debemos cuidar el nitrógeno. La mayor preocupación de este elemento, es su papel en la promoción de cepa por envejecimiento y fragilidad, aunque también el nitrógeno actúa como elemento de aleación. Las fuentes de nitrógeno son dobles; las soldaduras consumibles (alambre y materias primas) tienen una contaminación del 80% del nitrógeno en el aire. Esto debe mantenerse a raya por CO y otros gases generados por la descomposición de los carbonatos y por volatilización de materiales en el recubrimiento del electrodo.

Molibdeno (Mn-Mo): Las soldaduras examinadas por Evans (p.171, 1997) tenían bajo carbono contenido en los cuatro niveles de manganeso estándar con 1.1% de adiciones de molibdeno. El contenido de elementos invariantes se mantuvo sensiblemente constantes, además de una tendencia al aumento del carbono relacionado con el aumento de molibdeno.

Níquel (Mn-Ni): Las soldaduras se hicieron para cuatro niveles de manganeso con adiciones de 0.5, 1, 2.3 y 3.5% Ni. Todos los elementos se realizaron en los niveles deseados.

El Níquel, cromo y molibdeno, desdibujan las señales visuales de la acumulación de los trabajos de soldadura en las macro secciones. A diferencia de estos elementos, el níquel por sí solo no mejora la estructura subyacente de grano austenita previo, aunque al agregar manganeso, antes, tiene mejores resultados.

Cobre (Cu): Las pruebas fueron realizadas con 1.5% Mn; éstos contienen niveles satisfactorios de todos los elementos. Sin embargo, el contenido de carbono en el metal para soldadura, tiene un promedio de 0.074%, era sensiblemente superior a las anteriores soldaduras con adiciones de Cr, Mo y Ni.

Metales bajo carbono 2.25% Cr - 1% Mo: La soldadura para estos era similar a la que se utiliza para los metales que contienen 1.25%Cr-0.5%Mo, salvo que, como los aceros 2.25%Cr-1%Mo cuando se sueldan estos aceros pueden sufrir de fragilidad, el riesgo de este problema se evaluó mediante la inclusión de un paso de enfriamiento, tratamiento térmico después de la soldadura (Post Weld Heat Treatment), a una temperatura de 690 °C.

Metales de soldadura 2.25%Cr-1%Mo de alto carbono: La composición de estos metales al soldarse con casi 0.1%C se puede observar en la tabla 2. Las pruebas se llevaron a cabo después de los mismos tratamientos de calor utilizados para la versión de bajo carbono de los mismos metales de soldadura, excepto que no se investigó PWHT a diferentes temperaturas.

Este acero mostro sensiblemente una mayor resistencia con poco carbono. El Manganese tuvo un efecto más pequeño, perdió más fuerza en comparación con el nivel inferior de carbono y perdido su efecto fortificante con 690 °C PWHT.

Tabla 2:
Composición química de metales que se utilizan para soldadura

Elementos %						
C	Mn	Si	S	P	Cr	Mo
0.092	0.59	0.28	0.008	0.008	2.42	1.02
0.093	0.89	0.27	0.007	0.008	2.42	0.98
0.093	1.24	0.30	0.006	0.008	2.46	1.02
0.094	1.66	0.29	0.006	0.011	2.46	1.02

Fuente: Schiborr and Laske Duplex Stainless Steels (p.953, 1997)

Titanio y manganese (Mn-Ti): En pruebas anteriores habían destacado la importancia de pequeñas adiciones de titanio y otros elementos de microaleación, para controlar la microestructura y dureza, otra serie de estas pruebas se llevó a cabo con toda la gama de contenido de manganese comenta Evans, para lo cual se agregaron los electrodos dando <5 ppm de cada elemento de microaleación en el metal de soldadura. Se realizaron pruebas tanto de soldadura y después PWHT durante 2 horas a 580 °C.

La austenita es la solución sólida del carbono en el hierro gamma que, dada la forma de su red atómica, tiene la posibilidad de mantener el carbono en solución incluso en cantidades notables.

La ferrita es la solución sólida de pequeñísimos porcentajes de carbono en el hierro alfa, que en virtud de su red atómica y a diferencia del hierro gamma, tiene pocas posibilidades de mantener el carbono en solución.

La perlita es, el eutectoide del diagrama hierro-carbono y está compuesta de láminas de ferrita y cementita alternadas entre sí.

La cementita es un compuesto de hierro y carbono, de fórmula Fe_3C , que contiene un porcentaje de carbono igual al 6.67%.

Se deduce que tendremos la posibilidad de distinguir esencialmente tres familias de aceros inoxidables:

²Los martensíticos, endurecibles con un tratamiento térmico.

Los ferríticos de estructura ferrítica estable independiente de la temperatura.

Los austeníticos de estructura austenítica estable independiente de la temperatura.

² Ver tablas anexas pp. 87-88

Y también los de nuestro interés los aceros de estructura dúplex, denominados austeno-ferríticos (en los que la composición está equilibrada para que junto a la austenita exista también una cierta cantidad de ferrita).

Los sistemas de designación de los aceros inoxidables, se refieren esencialmente a: clasificaciones, unificaciones, convenios de aceptación.

También existen los aceros dúplex ($20\% < Cr < 30\%$), ($5\% < Ni < 8\%$), ($C < 0.03\%$), no endurecibles por tratamiento térmico, muy resistentes a la corrosión por picaduras y con buen comportamiento bajo tensión. Estructura de ferrita y austenita.

1.4.3 Composición de los aceros inoxidables.

Como se indicó anteriormente además del cromo, el elemento base de los aceros inoxidables pueden intervenir diferentes elementos como níquel, molibdeno, volframio, manganeso, aluminio, titanio, niobio, cobre, nitrógeno etc., que según en las cantidades que se encuentren en los aceros, adquieren diferentes propiedades las cuales se mencionan a continuación.

Influencia del manganeso en la composición de los aceros inoxidables: Inchaurrea dice que este elemento, más que favorecer la formación de la austenita lo que hace es aumentar su estabilidad (su influencia en los aceros con cromo es la mitad de la del níquel). Favorece la formación de una fase peligrosa para los aceros inoxidables. La fase sigma en los aceros ferríticos con 25% a 30% de cromo, con contenido superior al 10% conseguimos aceros austeníticos, inhibe la fragilidad en caliente al formar sulfato de manganeso.

Influencia del silicio: Es un elemento alfaceno, ya que favorece la formación de la ferrita y por consiguiente la formación de la ya mencionada fase sigma que se debe de tener cuidado en los aceros ferríticos con 25 a 30% de cromo y en los austeníticos con un nivel de cromo superior al 19%. Este elemento aumenta la formación de estructuras bifásicas ($\alpha + \gamma$) y aumenta la resistencia en caliente.

Influencia del molibdeno: Aumenta la resistencia en caliente de los aceros austeníticos. Favorece la pasividad y resistencia química en presencia de ácidos reductores; en la alación níquel-cromo, molibdeno favorece la formación de fase sigma y aumenta la resistencia en los aceros ferríticos en los ácidos orgánicos; favorece la maduración de los aceros endurecibles por precipitación, compuestos de hierro- molibdeno- cromo.

Influencia del aluminio: Mejora la resistencia a la corrosión en ambientes salinos favorece la formación de estructuras bifásicas ($\alpha + \gamma$); es un elemento alfaceno ya que favorece la formación de ferrita.

Influencia del nitrógeno: Es un elemento gammageno y produce efectos semejantes a los del carbono. Reduce la tendencia a la corrosión por picaduras; facilita la deformación en frío y en caliente de los aceros ferríticos y austeníticos.

1.4.4 Aceros inoxidables martensíticos

Como ya se ha dicho, los aceros inoxidables martensíticos son esencialmente aceros al cromo (11 a 18%) que contienen pequeñas cantidades de otros elementos de aleación, como, níquel, pero en este caso en cantidad nunca superior al 2.5%. Los contenidos de carbono pueden variar entre un mínimo de 0.08% hasta un máximo de aproximadamente 1.20%.

Sólo debemos recordar, por ahora, que las mejores condiciones de resistencia a la corrosión de estos aceros son las correspondientes al estado templado y de eliminación de tensiones a temperaturas alrededor de aproximadamente 150 y 200°C.

Observemos que en general el peso específico se distingue poco del de los aceros comunes al carbono y de aleación baja-media, junto con el módulo de elasticidad, coeficiente de dilatación lineal y calor específico. La resistividad específica es, al contrario, mucho más elevada. Por otra parte, la conductividad térmica resulta inferior, al menos para temperaturas no superiores a los 900°C.

La permeabilidad magnética de los aceros inoxidables martensíticos los clasifica entre los materiales ferromagnéticos. Las características mecánicas a temperaturas inferiores a la ambiente de los aceros martensíticos, como en general en caso de todos los aceros aleados de estructura no austenítica, señalan una brusca reducción de la tenacidad pasando de la temperatura ambiente a temperaturas inferiores y notablemente a temperaturas inferiores a 0°C.

Por ello tales aceros, cuando se emplean a temperaturas bajas y notablemente inferiores a 0°C, es preciso que hayan sufrido rápidamente un tratamiento de bonificación, es decir, que presenten una estructura martensítica revenida. Estos aceros tienen en efecto buenas características de resistencia en caliente hasta temperaturas de 650°C y han sido aplicados en gran medida en la construcción de palas de turbinas a vapor, dadas sus buenas características de resistencia a la oxidación.

1.4.5 Aceros inoxidables ferríticos

Se trata esencialmente de aleaciones hierro-cromo-carbono, ocasionalmente con leves aportes de otros elementos, como el molibdeno. Su estructura es por ello ferrítica aunque en tal estructura pueda encontrarse carburos precipitados.

La ausencia de puntos de transformación acarrea la imposibilidad práctica de mejorar las características mecánicas mediante tratamientos térmicos. Tales características pueden, empero, potenciarse practicando en estos aceros trabajos de deformación en frío (trefilado, laminación, etc.) capaces de producir acritud³.

³ Es un fenómeno que aparece prácticamente en todos los materiales metálicos objeto de deformación plástica a temperatura ambiente o poco superior a ella.

Algunos aceros ferríticos, pueden presentar estructura bifásica y estar, por consiguiente, sometidos a endurecimiento por temple.

Se puede destacar que el peso específico disminuye a medida que aumenta el contenido en cromo, y por término medio es algo inferior al de los aceros martensíticos. La resistividad eléctrica es un poco superior y es función del contenido en cromo, en proporción directa. Los aceros inoxidable ferríticos en todas las condiciones son magnéticos.

Las características mecánicas a temperaturas inferiores a la ambiente revelan como los aceros ferríticos son los peor adaptados entre los aceros inoxidable para aplicaciones a temperaturas inferiores a la ambiente. Aparece en efecto una brusca reducción de la tenacidad a temperaturas apenas inferiores a la ambiente.

Las características mecánicas a temperaturas superiores a la ambiente para los aceros inoxidable ferríticos presentan una resistencia a la oxidación en caliente tanto mayor cuanto mayor es su contenido en cromo.

1.4.6 Aceros inoxidable austeníticos

Su estructura es austenítica en todo el ámbito de su existencia, y por ello se obtiene, recordémoslo, en función del oportuno equilibrio de los elementos ferritizantes y austenitizantes. En la familia de los aceros inoxidable austeníticos se distinguen dos grupos: el de los austeníticos al cromo-níquel, por una parte, y al cromo-manganeso-níquel, por otra.

El primer grupo es el más importante, dado que a él pertenecen la mayor parte de los aceros inoxidable comúnmente empleados, y está compuesto por aleaciones hierro-carbono-cromo-níquel con aporte ocasional de otros elementos, como el molibdeno, el titanio, el niobio, etc.

El segundo grupo, por el contrario, es cuantitativamente más modesto (representa aproximadamente el 5% de todos los aceros inoxidable austeníticos) y está formado por aleaciones de hierro-carbono-cromo-manganeso-níquel; de éste, precisamente por su menor importancia. Los aceros austeníticos al cromo-níquel contienen cantidades de carbono comprendidas entre valores inferiores a 0.03%, y magnitudes del orden de 0.25%; cromo en cantidades de entre el 17 y el 26%, y níquel de entre el 7 y el 22%; los demás elementos aditivos permiten obtener determinadas características.

Las características mecánicas a temperatura ambiente son similares a las de los tipos normales; por el contrario, resulta mejorada la resistencia a los choques de las juntas soldadas en aplicaciones a bajísimas temperaturas, como la del hidrógeno líquido (-254 °C); las características mecánicas en caliente son, empero, inferiores a las de los tipos estabilizados.

La densidad es ligeramente superior al de otros aceros inoxidable y es por término medio unos 8 N/m³. Tanto la conductividad térmica, como el coeficiente de dilatación térmica, como la resistividad eléctrica, son muy diferentes de los valores correspondientes de los aceros aleados no

inoxidables. La permeabilidad magnética de los aceros inoxidable austeníticos es inferior a 1.02 en el estado recocido, y por ello son esencialmente amagnéticos, en este estado.

Como ya hemos tenido oportunidad de advertir, los aceros inoxidable austeníticos están particularmente sujetos al fenómeno de acritud para alcanzar valores pertinentes de carga de rotura y límite elástico, manteniendo no obstante, todavía valores relativamente elevados de alargamiento y de estricción.

La permeabilidad magnética de los aceros austeníticos, que, como se ha visto, es normalmente muy baja, próxima a la de vacío, hasta el punto de ser considerados materiales amagnéticos, tiende a aumentar, según los tipos, con el aumento de la acritud. De estos datos puede extraerse la conclusión de que los aceros austeníticos, aun careciendo de características mecánicas particularmente elevadas, en particular por lo que interesa al límite elástico, ofrecen todos modos buenas posibilidades de mejorarlas al ser deformados en frío. Las características de tenacidad, manifestadas sobre todo por los valores de resiliencia así como por los de alargamiento y estricción, son, por el contrario, muy elevadas. Las características de resistencia a la fatiga de los aceros inoxidable austeníticos se consideran bastantes buenas si se tienen en cuenta los bajos valores de las cargas de límite elástico.

Los aceros inoxidable austeníticos aumentan notablemente, con la reducción de la temperatura sus características de resistencia, mientras disminuyen el alargamiento a la ruptura y la estricción. Características mecánicas a temperaturas superiores a la ambiente, ante todo conviene destacar que también entre los aceros austeníticos algunos tipos son particularmente aptos para aplicaciones a elevada temperatura. Generalmente, desde el punto de vista de la oxidación a altas temperaturas, todos los tipos austeníticos muestran buenas características.

Los aceros austeníticos al cromo-manganeso-níquel fueron estudiados alrededor de los años treinta del siglo pasado. “Serie 200”, parte del níquel (aproximadamente el 4%) se sustituyen por otros elementos austenitizantes, como el manganeso (presente en proporción aproximada del 7%) y el nitrógeno (contenido en proporción no superior al 0.25%). Estos aceros que se endurecen más que los de cromo-níquel, y que en general su límite elástico es mayor tanto en caso de material recocido como en el material en estado duro. En cuanto a las características en frío, no son sustancialmente distintas de las de la “serie 300”, y en lo más específicamente relativo a la resistencia al choque, no presentan temperaturas de transición. Las características mecánicas a temperaturas elevadas son generalmente superiores a las de los correspondientes tipos austeníticos al cromo-níquel. Debido a sus características austenitizantes como el elemento parcialmente sustitutivo del níquel. Hoy se utiliza, empero, por la mejora de las características de resistencia que confiere a los aceros austeníticos. Permiten la reducción de las secciones resistentes de las estructuras, con la consiguiente mejor utilización del material.

Su influencia sobre las características de resistencia a bajas temperaturas es benéfica, y ello permite obtener buenas características mecánicas, por otra parte también en los de más aceros austeníticos, a temperatura del orden incluso de -200°C referente a la corrosión por picaduras e intercrystalina. La soldabilidad es buena si se adoptan las medidas pertinentes.

Aceros inoxidables austeno-ferríticos estos son aceros inoxidables con contenido en cromo siempre superior al 16%. Presentan una estructura mixta de austenita y ferrita, de ahí su denominación “microdúplex” o “semiferríticos” con que a veces se les conoce. Más concretamente, se trata por lo general de una matriz ferrítica en la que se encuentra dispersa la austenita, y los elementos que estos aceros contienen en solución son, además del cromo, esencialmente el níquel, el molibdeno, el manganeso y el silicio. Ofrecen una soldabilidad mejor que la de los aceros ferríticos, y simultáneamente características de resistencia a la corrosión bajo tensión superiores a la de los aceros austeníticos, estando prácticamente exentos del peligro de corrosión por picadura superior a la de los tipos ferríticos, y una resistencia a la corrosión en ambientes fuertemente ácidos bastante similar a la de los aceros austeníticos normales al cromo-níquel. Se deduce de ello el interés que despiertan actualmente estos aceros en caso de aplicaciones sometidas a corrosión en ambiente marino y también en el caso de productos alimenticios salados.

Recordemos que sus características mecánicas a temperatura ambiente son generalmente superiores a las de los tipos ferríticos corrientes, y que tales propiedades se mantiene también por efecto de endurecimiento por deformación plástica en frío. Aunado a lo anterior la resistencia a la fatiga en algunos casos es superior a la del tipo austenítico.

La resistencia en caliente es intermedia entre la de los tipos ferríticos y la de los austeníticos; los austenoferríticos presentan buenas características de resistencia a la oxidación en caliente hasta unos $1,100^{\circ}\text{C}$. La formación de la fase “sigma”, a la que están sujetos, limita su empleo en caliente, pues se produce fragilización.

1.4.7 Aceros inoxidables endurecibles por precipitación.

El Centro para la investigación y desarrollo del acero inoxidable en España (CEDINOX). Dice que estos tipos de aceros se denominan “endurecibles por precipitación” o PH (por su denominación inglesa, precipitation hardening), ofrecen una alternativa a los aceros inoxidables austeníticos cuando se desee asociar elevadas características de resistencia a la corrosión con características mecánicas estáticas y dinámicas de elevado nivel, y con óptimas características de maquinabilidad. Pueden subdividirse esencialmente en tres clases: martensíticos, semi-austeníticos y austeníticos.

Tipos martensíticos. Estos aceros son esencialmente martensíticos después de un tratamiento de recocido, aproximadamente a $1,040^{\circ}\text{C}$ y sucesivo enfriamiento al aire para el primero, o bien en aceite, agua o también al aire, para el segundo.

Los tipos semi-austeníticos se diferencian de los del grupo anterior por un calentamiento a 1,050 °C y enfriamiento rápido a temperatura ambiente, son de estructura completamente austenítica. También la deformación en frío es capaz de provocar transformaciones en estos aceros, y la combinación de la deformación con los tratamientos de envejecimiento a temperaturas moderadas puede dar lugar a elevados valores de resistencia.

Los tipos austeníticos permanecen en dicho estado, sean cuales fueren, las condiciones de tratamiento. Normalmente se elaboran después de un tratamiento de solubilización a aproximadamente 1,100°C. Durante el rápido enfriamiento, los componentes de las fases endurecedoras permanecen disueltos en la matriz austenítica en condición meta estable.

Junto a estas características ofrecen, por lo general, también una buena maquinabilidad, una excelente resistencia a la corrosión, y buenas características de soldabilidad. Esencialmente, las propiedades físicas de los martensíticos se pueden considerar relativamente independientes del tratamiento de envejecimiento. La misma consideración puede aplicarse a propósito de los tipos austeníticos.

Las características mecánicas no se separan mucho a temperaturas inferiores a la ambiente, lo mismo sucede entre la resistencia al choque de los tipos martensíticos y semi austeníticos.

1.4.8 Aceros inoxidables dúplex

La International Molybdenum Association (IMO) Menciona que los aceros inoxidables dúplex combinan buena resistencia a la corrosión con buenas propiedades mecánicas y facilidad en su producción, sus propiedades físicas se sitúan entre las de los aceros inoxidables austeníticos y ferríticos, pero con tendencia a estar más próximas a las de los aceros ferríticos y aceros al carbono. La resistencia de los aceros inoxidables dúplex a la corrosión por picaduras y a la corrosión por intersticios causados por cloruros, se debe al contenido de cromo, molibdeno, wolframio y nitrógeno.

Todos los aceros inoxidables dúplex tienen una resistencia a la corrosión bajo tensiones en presencia de cloruros muy superiores a la de los aceros inoxidables austeníticos de la serie 300. Todos ellos poseen una resistencia mecánica significativamente mayor que la de los tipos austeníticos, además de una buena ductilidad y tenacidad.

Los aceros inoxidables dúplex (austeno-ferríticos) ofrecen una elevada resistencia a la corrosión intergranular. Esto es debido a que los carburos de cromo precipitan ferrita alrededor de los cristales de la austenita, impidiendo que en los límites de grano de la misma se forme una capa continua de carburos.

1.5 Características generales de los aceros inoxidable más comunes

Algunas de las compañías más importantes en la fabricación de acero inoxidable, como son U.S. Steel, ArcelorMittal, Baosteel, dan a conocer las características y aplicaciones de los aceros inoxidable más comunes y usados.

Características generales 304L (UNS S 30400 / 30403): Uno de los aceros inoxidable más utilizados y versátiles. Este grado de acero inoxidable se encuentra en una variedad de sectores comerciales, en particular en la industria química. Es una especie de material para uso en condiciones muy corrosivas, se utilizan componentes de calibre grueso para mejorar la capacidad de soldadura, recocido de soldadura sólo es necesario, en aplicaciones, si las cargas de tensión son excesivas.

Aplicaciones: Medios urbanos, solución ácido nítrico, en la mayoría de los ácidos orgánicos diluidos a temperaturas moderadas, en la mayor parte de productos alimenticios y farmacéuticos, ácido fosfórico puro ó cualquiera que sea la concentración en solución fría, así mismo, diluido hasta un 10% en solución sulfúrica en caliente de ácido clorhídrico aumenta la resistencia a la corrosión.

Así, las principales aplicaciones son; en la industria de procesamiento de alimentos y solución de ácido nítrico diluido.

Características generales (UNS S 31600 / S 31603): Aleación 316 / 316 L es molibdeno-rodamiento de acero inoxidable austenítico. Cuanto mayor sea el níquel y el molibdeno contenido en este grado le permite demostrar mejor las propiedades de resistencia a la corrosión en general que un acero 304, especialmente con respecto a picaduras y corrosión por agrietamiento del material en medios con un alto contenido de cloruro. Además, la aleación 316/316L proporciona una excelente tracción a elevada temperatura, fluencia y de rotura por fatiga, así como capacidad de conformación excepcional y capacidad de soldadura. 316L es la versión de carbono inferior de 316 y es inmune a la sensibilización; Por lo tanto, presenta excelente soldabilidad por todos los métodos de fusión estándar, con y sin metales de relleno. Así como partes soldadas hechas con un acero inoxidable de Grado 316 requieren de recocido posterior a la soldadura para una máxima resistencia a la corrosión, esto no es necesario para el grado 316L.

Aplicaciones: Ampliamente utilizados en equipos de preparación de alimentos, especialmente en entornos de cloruro, procesos químicos, equipos de bancos y accesorios de laboratorio caucho, plástico, papel y pasta de papel para maquinaria, equipos de control de la contaminación, intercambiadores de calor, industrias farmacéuticas y textiles, condensadores, evaporadores y tanques.

Características generales (UNS N 08020): La aleación 317L contiene molibdeno, acero inoxidable austenítico bajo en carbono con un aumento de condiciones de cromo, níquel y molibdeno para una mejor resistencia a la corrosión y una mayor resistencia al ataque químico para sulfuroso, acético, fórmico, cítrico y tartárico. Debido a su bajo contenido de carbono, el 317L también proporciona resistencia a la sensibilización y soldadura y fluencia superior, tensión a la rotura y resistencia a la tracción a temperaturas elevadas. No magnético en estado recocido, pero puede llegar a ser poco magnética después de la soldadura. Demuestra

resistencia a la corrosión en ambientes difíciles, incluyendo una amplia gama de productos químicos, especialmente en entornos de cloruro por ácidos.

Aplicaciones: La aleación 317 L se utiliza comúnmente para manejar el azufre, el licor de pulpa, colorantes ácidos, acetilante, soluciones blanqueadoras, aceite, y muchos compuestos químicos. Algunas otras aplicaciones incluyen. Equipos y manipulación de papel de pulpa, e n tanques químicos y procesamiento petroquímico, condensadores de fósiles y estaciones de generación eléctrica con alimentación nuclear, equipos para la industria alimenticia y equipamiento textil.

Características generales (UNS S 31726): Aleación 317LMN es austenítico, de mayor contenido de molibdeno al eado con nitrógeno adicional que es particularmente eficaz en la mejora de la resistencia a la corrosión, por picaduras y grietas y también tiene una excelente resistencia al ataque químico. Su composición baja en carbono proporciona resistencia a la sensibilización durante la soldadura y el nitrógeno adicional sirve para aumentar su fuerza. La aleación 317LMN tiene la resistencia a la corrosión acuosa más alta de todos los aceros inoxidable es tándar y también tiene mayor fluencia, de es tré a la rotura, y resistencia a la tracción a temperaturas más altas. Soldable por todos los métodos comunes, debido a la restricción de bajo carbono, se reducirá al mínimo la precipitación de carburo largo de los límites soldadas.

Características generales S S 410 (S41000): Es resistente a algunos productos químicos, alimentos, ácidos suaves, agua y corrosión por aire. También demuestra una resistencia adecuada al ácido nítrico, ácido sulfúrico concentrado, ácido acético diluido y n afta. Propiedades mecánicas elevadas y resistencia a la corrosión que se logran con el acero inoxidable 410 cuando se ha endurecido y templado.

Aplicaciones: se utiliza en aplicaciones tales como los instrumentos dentales y quirúrgicos, tuberías, válvulas y tuberías, piezas de automóviles y mucho más. El 410 S S se utiliza generalmente para aplicaciones que evitan la corrosión suave, de alta resistencia, y resistencia al calor.

AZOM (De la A la Z de Materiales), define a otros aceros inoxidables tales como son.

Características generales 420 (UNS S42000): El grado 420 de acero inoxidable es un acero de alto carbono con un contenido mínimo de cromo del 12%. Al igual que cualquier otro tipo de acero inoxidable de grado 420 también se puede endurecer mediante tratamiento térmico. Ofrece una buena ductilidad en sus propiedades de resistencia a la corrosión del estado y excelentes recocidos. Este grado tiene la mayor dureza - 50HRC - entre todos los tipos de acero inoxidable con 12% de cromo. Estos aceros se fabrican generalmente usando métodos que requieren tratamientos de temple y revenido. Las condiciones de funcionamiento de los aceros martensíticos se ven afectadas por la pérdida de la fuerza del material a altas temperaturas, y la disminución de la ductilidad a temperaturas negativas.

Aplicaciones: Las principales aplicaciones de aceros inoxidables de grado 420 incluyen. Cuchillas de corte, las válvulas de aguja, equipos quirúrgicos.

Características generales (UNS S45000): es un acero inoxidable tipo martensítico. Tiene una alta ductilidad y resistencia. Tiene un límite de elasticidad que es casi 3 veces la fuerza del grado 304 de acero inoxidable. Usa avances y velocidades comparables con otros aceros inoxidables martensíticos. Se refiere el uso de alimentaciones positivas y velocidades lentas para lograr buenos resultados; la aleación de acero inoxidable de grado 450 se puede soldar utilizando métodos blindados para reducir la contaminación.

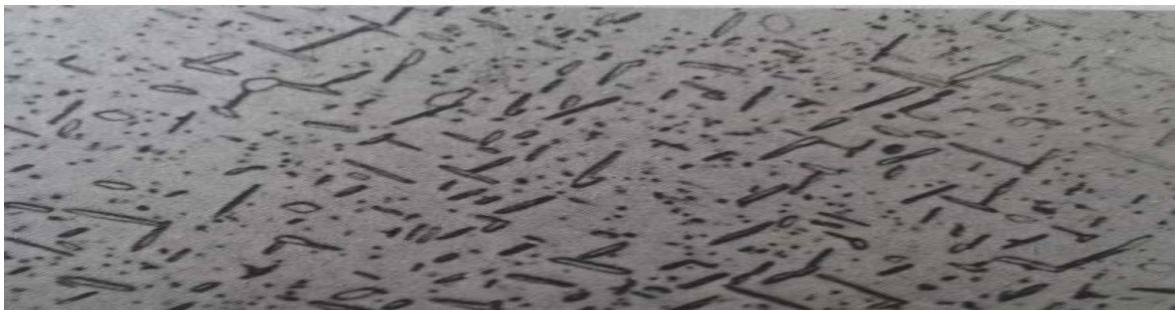
Aplicaciones: se utiliza principalmente en aplicaciones en las que los martensíticos fallan en términos de resistencia a la corrosión, y los austeníticos estándar fallan en términos de requisitos de resistencia en ambientes corrosivos.

1.6 Fase sigma

Una de las razones de la formación de la fase sigma en los aceros inoxidables puede ser la presencia de ferrita en ellos. Cuando a estos se les mantiene por largo tiempo a temperaturas entre los 600° y los 800° C se debe de tener cuidado, la ferrita se transforma en un compuesto intermetálico (ya no es metal) de hierro y cromo. Esta fase se caracteriza por su pérdida de ductilidad y resistencia; es decir, debido a que es muy dura es muy frágil y por eso el cuidado cuando aparece esta fase en los metales.

Figura 1

Fase sigma en un acero X20Cr Ni 25-20.

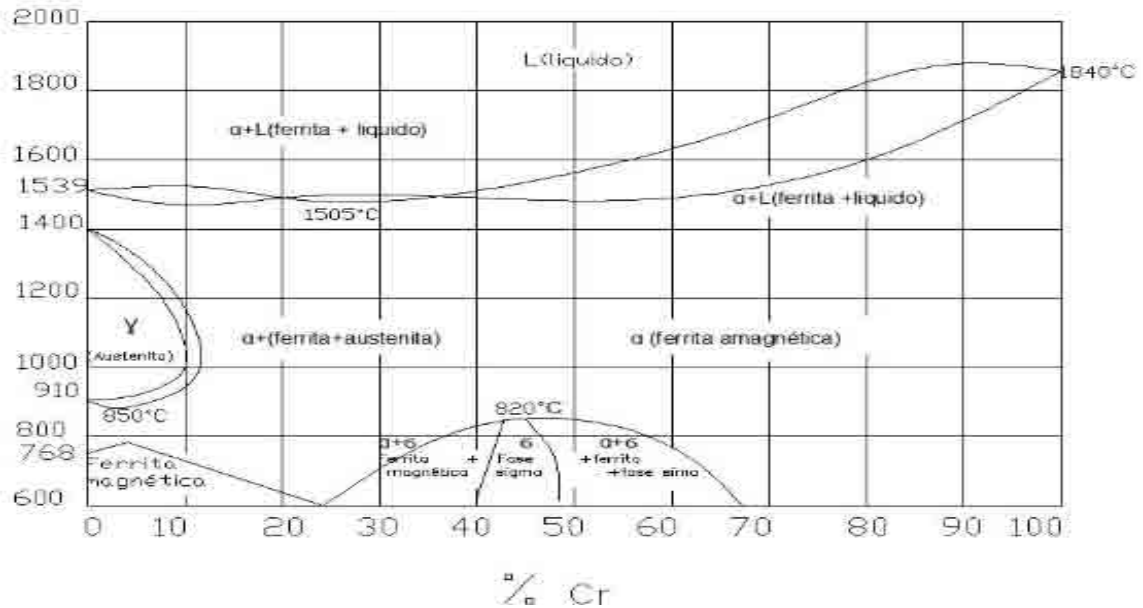


Fuente: Inchaurrea,(p.32,1981)

La fase sigma no solo puede darse en los aceros altos al cromo, ya que puede darse en los aceros ferríticos. También se forma en aceros austeníticos y austeno-ferríticos, sobre todo si esta favorecida por la presencia de una fase alfa rica en cromo. Una forma de valorar el efecto de los distintos elementos consiste en referir todos los elementos al cromo, y al níquel los elementos gammágenos.

Así se evita el empobrecimiento de cromo por formación de carburos. No obstante el cromo dentro del acero muy bajo en carbono puede combinarse con el hierro formando la fase sigma σ como se muestra en el diagrama 6. En el cual haremos alusión en el capítulo II del planteamiento que hace Pere, cuando trata el problema de corrosión en donde el papel de la fase sigma es preponderante.

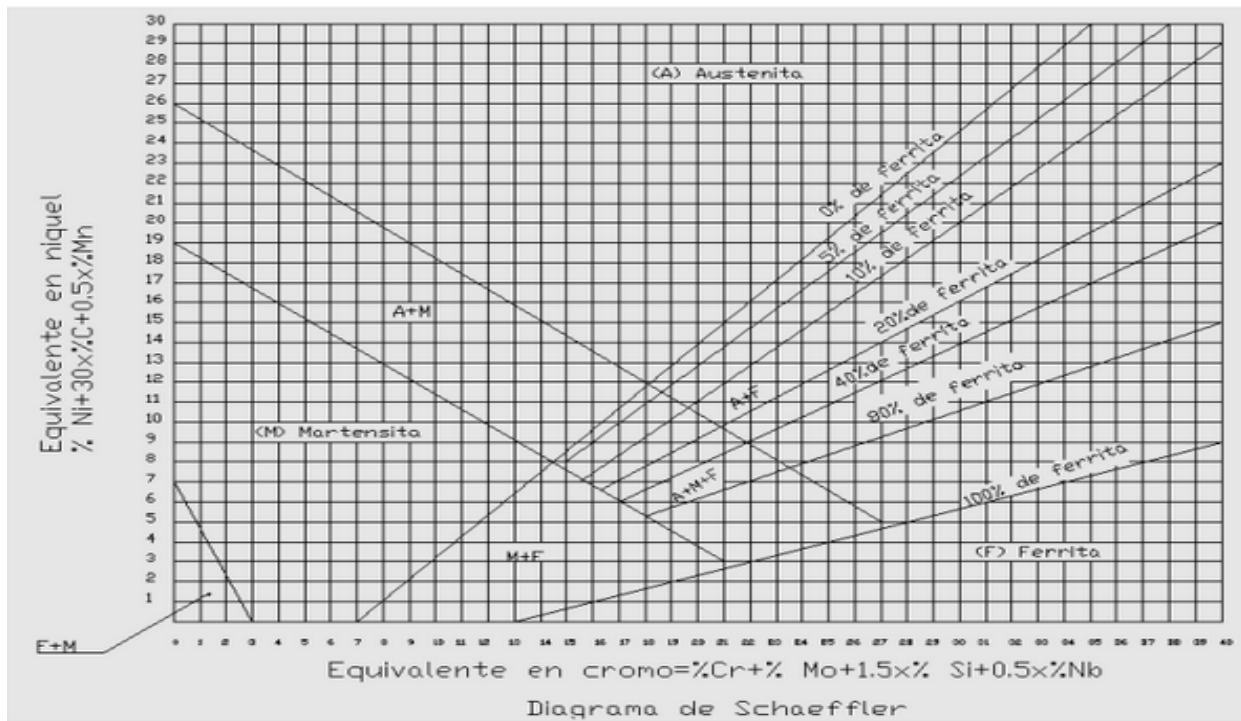
Diagrama 6: Fase sigma



Fuente: Pere. M. S, (p.68, 1989)

El diagrama de Schaeffler refleja las estructuras en función de los equivalentes de los elementos alfa y gamma en aceros inoxidables depositados por soldadura, como se puede ver en el siguiente diagrama 7.

Diagrama 7: Diagrama de Schaeffler



Fuente: Blog análisis de fallas (2007)

Una forma de conocer la posibilidad de transformarse en ferríticos, austeníticos y martensíticos, es utilizando el diagrama de Schaeffler. Conociendo la composición química del acero se

calculan el cromo y el níquel equivalente para saber cuál va a ser la microestructura resultante, así vemos que cuanto mayor es el níquel equivalente, mayor es la tendencia del material a ser austenítico.

1.7 Fabricación y Producción del Acero Inoxidable

UP commons de España, menciona que “El proceso de fabricación del acero inoxidable inicia con la fusión de hierro, chatarra y ferroaleaciones de acero al grado de acero inoxidable a preparar; continúa con la refinación del acero para eliminar impurezas y reducir el contenido de carbono; posteriormente el acero líquido se cuela, se corta en planchones y se forman los rollos en caliente. El proceso finaliza con el molino de laminación en frío, recocido y limpieza.

Laminación en frío: Los rollos de acero inoxidable rodados en caliente se usan como materia prima para el proceso de laminación en frío. Este proceso consta de cuatro etapas que son: recocido y decapado de la materia prima, molinos de laminación en frío, línea de recocido y limpieza final, y por último la estación de acabado superficial.

Producción de acero inoxidable. “El acero inoxidable es 100% reciclable como lo menciona Medina (pp.3-6, 2009) y tiene una de las tasas más altas de reciclado de cualquier material. Se estima que al menos 70% de los aceros inoxidables son reciclados al final de su vida útil. Dependiendo del tipo, ubicación y disponibilidad de la chatarra de acero inoxidable, la producción por medio de la ruta HAE (Horno de Arco Eléctrico) puede ser económicamente ventajosa. Además, el sistema de reciclado para el acero inoxidable es muy eficiente y no requiere subsidios.

El proceso de fabricación del acero inoxidable es el conjunto de transformaciones que sufre el material desde que se funden las materias primas hasta que se obtiene el espesor o diámetro deseado. Se puede dividir en tres etapas: acería, laminación en caliente y laminación en frío.

La etapa de acería es común independientemente de cuál sea el producto final que queramos obtener. Partiendo de chatarra, ferroaleaciones y otros elementos, se obtiene la composición química deseada por la que se definirá la calidad del acero inoxidable.

En la laminación en caliente se reduce el espesor o diámetro aprovechando la mayor ductilidad del material a altas temperaturas.

Laminación en frío es la etapa en la que obtenemos el espesor o diámetro final. La reducción se lleva a cabo sin un calentamiento previo.

1.7.1 Fabricación en horno eléctrico

La fabricación del acero en horno eléctrico se basa en la fusión de las chatarras por Medio de una corriente eléctrica, y al afino posterior del baño fundido.

El horno eléctrico consiste en un gran recipiente cilíndrico de chapa gruesa (15 a 30 mm de espesor) forrado de material refractario que forma la solera y alberga el baño de acero líquido y escoria. El resto del horno está formado por paneles refrigerados por agua. La bóveda es desplazable para permitir la carga de la chatarra a través de unas cestas adecuadas.

La bóveda está dotada de una serie de orificios por los que se introducen los electrodos, generalmente tres, los cuales son gruesas barras de grafito de hasta 700 mm de diámetro. Los electrodos se desplazan de forma que se puede regular su distancia a la carga a medida que se van consumiendo.

Los electrodos están conectados a un transformador o subestación que proporciona las condiciones de voltaje e intensidad adecuadas para hacer saltar el arco, con intensidad variable, en función de la fase de operación del horno.

Otro orificio practicado en la bóveda permite la captación de los gases de combustión, que son depurados convenientemente para evitar contaminar la atmósfera. El horno va montado sobre una estructura oscilante que le permite bascular para proceder al sangrado de la escoria y el vaciado del baño. El proceso de fabricación se divide básicamente en dos fases: la fase de fusión y la fase de afino.

1.7.2 Fase de fusión

Una vez introducida la chatarra en el horno y los agentes reactivos y escorificantes (principalmente cal) se desplaza la bóveda hasta cerrar el horno y se bajan los electrodos hasta la distancia apropiada, haciéndose saltar el arco hasta fundir completamente los materiales cargados. El proceso se repite hasta completar la capacidad del horno, constituyendo este acero una colada.

1.7.3 Fase de afino

El afino se lleva a cabo en dos etapas. La primera en el propio horno y la segunda en un horno cuchara. En el primer afino se analiza la composición del baño fundido y se procede a la eliminación de impurezas y elementos indeseables (silicio, manganeso, fósforo, etc.) y realizar un primer ajuste de la composición química por medio de la adición de ferroaleaciones que contienen los elementos necesarios (cromo, níquel, molibdeno, vanadio o titanio).

El acero obtenido se vacía en una cuchara de colada, revestida de material refractario, que hace la función de cuba de un segundo horno de afino en el que termina de ajustarse la composición del acero y de dársele la temperatura adecuada para la siguiente fase en el proceso de fabricación.

1.7.4 Flujos de materia en el proceso de fabricación del acero

Para producir una tonelada de acero virgen se necesitan 1500kg de ganga de hierro, 225kg de piedra caliza y 750kg de carbón (en forma de coque). La obtención del acero pasa por la eliminación de las impurezas que se encuentran en el arrabio o en las chatarras, y por el control, dentro de unos límites especificados según el tipo de acero, de los contenidos de los elementos que influyen en sus propiedades.

Las reacciones químicas que se producen durante el proceso de fabricación del acero requieren temperaturas superiores a los 1000°C para poder eliminar las sustancias perjudiciales, bien en forma gaseosa o bien trasladándolas del baño a la escoria.

1.8 Mecanizado de aceros inoxidables

Cada día es mayor la importancia que tiene en el mundo industrial, las técnicas de mecanización de los materiales ferrosos menciona el Ingeniero Adrián Inchaurrea Zavala. Estas técnicas se fijan unas veces en las máquinas y productos que deben utilizarse en los distintos tipos y procesos de mecanizado y otras en los materiales a mecanizar.

Son muchos factores que intervienen en el mecanizado de los aceros inoxidables dice Inchaurrea; las máquinas utilizadas, los elementos cortantes, los lubricantes la velocidad de refrigeración, etc. y por supuesto los materiales a mecanizar. Los dos factores fundamentales que condicionan una buena o mala mecanización de los aceros inoxidables son, la composición química y el estado estructural del mismo.

En primer lugar, dedicando la atención a la composición química de los aceros inoxidables, debemos distinguir principalmente a los ferríticos, martensíticos y austeníticos, ya que todos ellos presentan peculiaridades particulares en la mecanización.

Además de los elementos básicos que están presentes en la composición de los aceros inoxidables, podemos añadir otros, en unas proporciones limitadas, que favorecen sensiblemente la mecanización, sin deteriorar excesivamente la resistencia a la corrosión frente a ciertos agentes corrosivos. Estos elementos son: azufre, selenio, telurio, plomo, fósforo, etc., siendo los dos primeros los más importantes.

El azufre y el selenio, cuando están presentes en cantidades suficientes cambian en su mayor parte con los elementos metálicos del acero, como el manganeso, el molibdeno, etc., para formar sulfuros y seleniuros, que facilitan la rotura de la viruta. El resto quedará libre favoreciendo la lubricación del elemento cortante. En segundo lugar un papel importante en la mecanización es la composición estructural de los aceros.

Los aceros inoxidables martensíticos, que como la palabra indica son capaces de admitir el temple, se mecanizan mejor si están templados, siempre que la dureza está situada en un nivel determinado, que podemos considerar inferiores a los 240 Brinell. Si además contiene alguno o algunos elementos mencionados (azufre, selenio, etc.) en cantidades suficientes, su maquinabilidad quedará muy mejorada, consiguiéndose mecanizaciones inferiores pero próximas a las que corresponden a los aceros no aleados o de baja aleación de fácil mecanización.

Aunque pequeña, los aceros inoxidable ferríticos presentan mayor dificultad en la mecanización que los martensíticos, debido a que su estructura al ser ferrítica y no admitir temple es muy blanda. En la práctica se ha comprobado que estos aceros con un calentamiento entre 800 y 1000°C según sean los contenidos de carbono y cromo, seguido de un enfriamiento rápido, experimentan una ligera transformación estructural, a veces no apreciable en el microscopio, que les confiere una mayor dureza y por tanto una mejor maquinabilidad, que en algunos aceros es superior a la de los martensíticos.

La mecanización de los aceros endurecidos por precipitación dependerá del tratamiento de envejecimiento ejecutado. La maquinabilidad se conseguirá realizando primeramente el tratamiento de disolución seguido de un incremento mayor de temperatura. Si este tratamiento no fuera el adecuado por las exigencias de las características mecánicas en las piezas a mecanizar, podemos conseguir una mecanización aceptable solo con el tratamiento de disolución.

A continuación enumera Inchaurrea las precauciones generales a adoptar en el mecanizado de los aceros inoxidables

- 1.- Gran potencia de la máquina para conseguir velocidad de corte y avance, constantes.
- 2.- Buena sujeción de la pieza para evitar vibraciones
- 3.- Emplear elementos cortantes con gran resistencia al desgaste y la abrasión
- 4.- Que el perfil de cuchilla sea el adecuado para facilitar la salida de viruta
- 5.- Que los ángulos de corte sean vivos para evitar calentamiento excesivo. De esta manera el rozamiento entre el cuchillo y el acero será menor
- 6.- Que el tamaño del elemento de corte sea el mayor posible para la mecanización de los aceros inoxidables austeníticos, ya que al ser la conductibilidad térmica de estos menor que para el resto de los aceros, favorecerá la evacuación del calor.
- 7.- Buen caudal y gran presión con el lubricante adecuado, para reducir el calentamiento del elemento cortante y eliminar las virutas de pequeño tamaño.
- 8.- Que en mecanizaciones discontinuas, es especial en el torneado, se utilicen los elementos cortantes de acero rápido por su tenacidad. En el caso de usar elementos cortantes de metal duro, se recomienda que los ángulos de inclinación y desprendimiento sean negativos.

1.9 Aceros Inoxidables Comerciales

Kalpakjian, Serope; Schmid, Steven R. Presentan en su libro *Manufactura, Ingeniería y Tecnología, algunos de los aceros inoxidables más comerciales, los cuales describen y dan sus propiedades, como son:*

Acero inoxidable extra suave: contiene un 13 % de Cr y un 0.15 % de C. Se utiliza en la fabricación de: elementos de máquinas, álabes de turbinas, válvulas, etc. Tiene una resistencia mecánica de 80 kg/mm² y una dureza de 175-205 HB.

Acero inoxidable 16Cr-2Ni: tiene de 0.20 % de C, 16 % de Cr y 2 % de Ni; resistencia mecánica de 95 kg/mm² y una dureza de 275-300 HB. Se suelda con dificultad, y se utiliza para la construcción de álabes de turbinas, ejes de bombas, utensilios de cocina, cuchillería, etc.

Acero inoxidable al cromo níquel 18-8: tiene 0.18 % de C, un 18 % de Cr y 8 % de Ni. Tiene una resistencia mecánica de 60 kg/mm² y una dureza de 175-200HB, es un acero inoxidable muy utilizado porque resiste bien el calor hasta 400 °C.

Acero inoxidable al Cr- Mn: tiene 0.14 % de C, 11 % de Cr y 18 % de Mn. Alcanza una resistencia mecánica de 65 kg/mm² y una dureza de 175-200HB. Es soldable y resiste bien las altas temperaturas. Es amagnético. Se utiliza en colectores de escape.

Debido a sus superficies brillantes, en arquitectura se emplean muchas veces con fines decorativos. El acero inoxidable se utiliza para las tuberías y tanques de refinерías de petróleo o plantas químicas, para los fuselajes de los aviones o para cápsulas espaciales. También se usa para fabricar instrumentos y equipos quirúrgicos, o para fijar o sustituir huesos rotos, ya que resisten a la acción de los fluidos corporales. En cocinas y zonas de preparación de alimentos, los utensilios son a menudo de acero inoxidable, ya que no contaminan los alimentos y pueden limpiarse con facilidad.

1.10 Productos del Acero Inoxidable

Los productos según CEDINOX que se engloban en esta categoría y que vienen definidos por sus dimensiones son los platos, planchas, bobinas, chapas y discos. Su fabricación parte de los desbastes obtenidos de la acería y dependiendo del espesor, se obtienen por laminación en caliente o laminación en frío.

1.10.1 Producto largo (alambre) de acero inoxidable

Los productos de alambre se fabrican a partir del lambrón obtenido tras la laminación en caliente. Su fabricación es también condicionada a cual vaya a ser la aplicación: soldadura, estampación, muelles, color, etc.

Capítulo II

Resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables

La corrosión de los metales alcanza proporciones muy grandes, pues se calcula que el tonelaje de metales ferrosos destruido anualmente por la corrosión representa la cuarta parte de la producción anual de los mismos. Los principales agentes de corrosión son la atmósfera de las ciudades y centros industriales, cargada de sulfuros desprendidos por la combustión en los hogares, las aguas de lluvia que arrastran las impurezas atmosféricas y contiene cantidades pequeñas de ácidos nítricos y sulfúricos; por último las aguas marítimas. La corrosión galvánica, que se caracteriza por su poder destructivo, resulta de un fenómeno de electrolisis entre dos metales de potencial eléctrico diferente que se halla en contacto con la humedad.

2.1 Corrosión de los metales

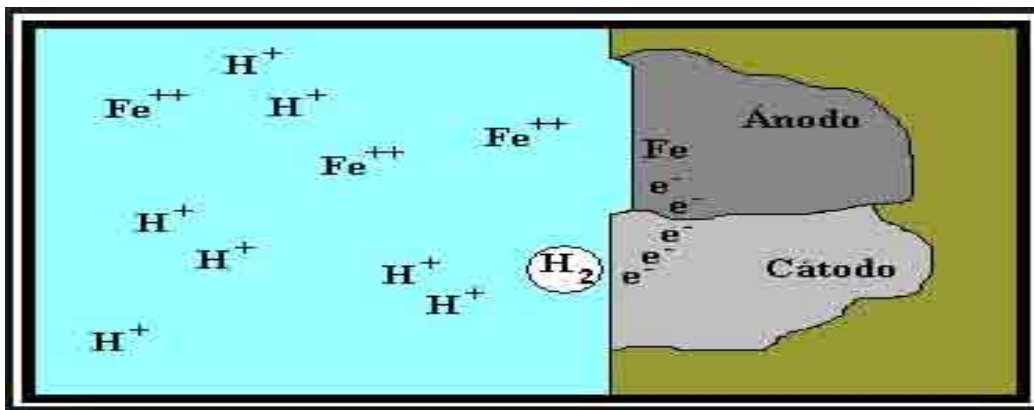
Como se menciona en el libro de “Introducción a la metalurgia física” de Avner, la corrosión puede definirse como “la destrucción de un material por interacción química, electro-química o metalúrgica entre el medio y el material”. Generalmente es lenta, pero de carácter persistente. En algunos ejemplos, los productos de la corrosión existen como una película delgada adherente que solo mancha o empaña el metal y puede actuar como un retardador para una posterior acción corrosiva. En otros casos, los productos de la corrosión son de carácter voluminoso y poroso, sin ofrecer ninguna protección. En algunos casos, con el ataque químico directo, la corrosión es alternativamente obvia, pero en otros, como la corrosión Intergranular, es menos obvia pero igualmente dañina. La principal causa de la corrosión es la inestabilidad de los metales en sus formas refinadas.

La corrosión es esencialmente un proceso electro-químico que origina la transformación del estado metálico al iónico. Para completar el circuito eléctrico, debe haber dos electrodos, un ánodo y un cátodo, mismos que deben conectarse. La conexión entre el ánodo y el cátodo puede ser mediante un puente metálico, pero en la corrosión se lleva a cabo simplemente por contacto.

Sobre la superficie del metal hay numerosas y pequeñísimas áreas cátodos y ánodos producidas por las inclusiones en el metal, las imperfecciones superficiales, los esfuerzos localizados, la orientación de los granos o quizá las variaciones en el medio. Así, conforme este proceso avanza, la oxidación y la corrosión de hierro se presentan en los ánodos, y la conservación del material ocurre en los cátodos. La cantidad de metal que se disuelve es proporcional al número de electrones que influyen, lo cual a su vez depende del potencial y la resistencia del metal.

En la siguiente figura 2 se muestra como, en el ánodo, los átomos de hierro positivamente cargados se separan por sí mismos de la superficie sólida y entran a la solución como iones positivos, mientras que las cargas negativas, en la forma de electrones, se dejan atrás en el metal. En el cátodo, los electrones neutralizan algunos iones de hidrogeno positivos que han llegado a la superficie por el electrolito. Al perder su carga positiva llegan a ser átomos neutrales para formar gas de hidrogeno y así se presenta la oxidación y corrosión en los ánodos, y el desprendimiento de hidrogeno en los cátodos.

Figura 2:
Ilustra la formación de iones en el ánodo, y de hidrógeno en el cátodo en una celda de acción local.



Fuente: Avner (p.579, 1966)

Así mismo, Avner señala que uno de los factores más importantes que influyen en la corrosión es la diferencia de potencial eléctrico de metales no similares cuando se acoplan conjuntamente y sumergidos en un electrolito. Este potencial se debe a las naturalezas químicas de las regiones anódica y catódica. Un metal acoplado con otro cercano a él sobre esta lista corroerá generalmente en forma más lenta que cuando se acopla con otro más alejado por debajo de él. Si el ion metálico se elimina mediante la formación de un compuesto insoluble precipitado sobre el ánodo, y esta película es adherente e impermeable a la solución de corrosión, resulta un aislamiento completo y la corrosión se detiene. La película de óxido de este tipo se forma sobre aluminio y cromo, mismo que responde de su superior resistencia a la corrosión.

Si el oxígeno actúa para eliminar hidrógeno de los alrededores del cátodo, se incrementa la corrosión. La efectividad del oxígeno para eliminar hidrógeno está influida por la cantidad de área de cátodo. La agitación actúa para incrementar la rapidez de corrosión poniendo solución fresca corrosiva en contacto con el metal.

Las diferencias en potencial de punto a punto sobre una misma superficie de metal producen corrosión, conocida como acción local, la cual puede deberse a impurezas sobre la superficie o a diferencias en la estructura de la superficie o del ambiente.

2.1.1 Tipos específicos de corrosión

Cuando toda la superficie del metal se ataca al mismo grado, se conoce como *corrosión uniforme*. La *corrosión por formación* de pequeños huecos en la superficie es un ejemplo de corrosión no uniforme resultante de inhomogeneidades en el metal, debido a inclusiones (sustancias extrañas que impurifican los minerales).

La *corrosión por cavitación*, se produce por el choque de burbujas y cavidades dentro de un líquido. El movimiento de vibración entre una superficie y un líquido es tal que se aplican repetidas cargas a la superficie, produciendo esfuerzos muy altos cuando se forman estas burbujas y chocan regularmente. Estos choques producen impactos de alto esfuerzo que eliminan

gradualmente partículas de la superficie, formando de manera eventual profundos agujeros sobre la superficie, depresiones y marcas de viruela.

La *corrosión por grieta* es un término general que incluye ataque acelerado en el punto de unión de dos metales expuestos a un ambiente corrosivo. El oxígeno tiene acceso relativamente fácil al exterior de la unión, que es catódica.

La *corrosión por rozamiento* es un tipo común de daño a la superficie producido por vibración, la cual causa choques o rozamiento en la interfaz de superficies sometidas a altas cargas y estrechamente ajustadas. Este tipo de corrosión es un fenómeno mecánico-químico.

La *corrosión intergranular* es corrosión no uniforme cuando existe una diferencia de potencial entre las fronteras de grano y el resto de la aleación.

La *corrosión por esfuerzo* es la aceleración de la corrosión en ciertos ambientes cuando los metales se someten a esfuerzos externamente o contienen esfuerzos tensiles internos debidos al trabajo en frío. La *corrosión por esfuerzo* es uno de los más importantes tipos de corrosión, la presencia de fisuras mediante corrosión por esfuerzo se ha reconocido como principal causa de que fallen los aceros austeníticos inoxidables en procesos en los que interviene un ambiente con cloruro.

La *corrosión preferencial* de una de las componentes puede ocurrir aun en aleaciones unifásicas de solución sólida. La *corrosión galvánica* ocurre en la interfaz donde dos metales están en contacto en un medio de corrosión.

La *corrosión metal-líquido*, la solubilidad de un sólido en un líquido aumenta generalmente con la temperatura; por tanto, hay tendencia a que un sólido se disuelva hasta su límite de solubilidad, la parte caliente es corroída continuamente, en tanto que la fría se obstruye con los productos depositados por la corrosión.

2.1.2 Métodos para combatir la corrosión

Los métodos más importantes según Avner son los siguientes:

1. *Utilización de metales de alto grado de pureza*
2. *Empleo de adiciones de aleación*
3. *Utilización de tratamientos térmicos especiales*
4. *Diseño adecuado*
5. *Protección catódica*
6. *Empleo de inhibidores*
7. *Revestimientos superficiales*

La *utilización de metales con alto grado de pureza* tiende a reducir la corrosión por agujeros en la superficie, minimizando las heterogeneidades.

Las *adiciones de aleación* pueden reducir la corrosión mediante diversos métodos; por ejemplo, los aceros austeníticos inoxidables, cuando se enfrían a través de un intervalo de temperatura desde 483-760 °C, precipitan carburos de cromo en las fronteras de grano, precipitación que agota el cromo en las fronteras y las hace más susceptibles a corrosión intergranular.

Los *tratamientos* para suprimir las tensiones ocasionadas por el trabajo en frío se aplican mucho para mejorar la resistencia de las aleaciones susceptibles a corrosión por esfuerzo.

Las grietas pueden evitarse *utilizando soldaduras* en vez de sujetadores mecánicos, o empleando empaquetaduras aislantes entre las superficies paralelamente maquinadas.

La *protección catódica* se obtiene colocando el metal que normalmente sería corroído, en contacto eléctrico con uno que este encima de él en la serie galvánica.

Los inhibidores son agentes químicos que cuando se añaden a la solución corrosiva, reducen o eliminan su efecto corrosivo. En la mayoría de los casos, el *inhibidor* formara una capa protectora sobre la superficie del metal. La pintura proporciona una película protectora para el metal y es efectiva sólo durante el tiempo que se conserva intacta.

Algunos ejemplos son: un baño ácido de cromato protege al magnesio formando una película de cromato de magnesio; el parkerizado para aleaciones ferrosas protege mediante la formación de una película de fosfato; el anodizado en el aluminio y magnesio forma una película gruesa de óxido, y la pasivación de los aceros inoxidable también forma una película de óxido.

El *revestimiento* de zinc, o galvanizado, se aplica a una mayor cantidad de productos de acero que cualquier otro método de revestimiento metálico. Los revestimientos electrodepositados se usan mucho con fines decorativos, pero para aplicaciones industriales la función más importante es proteger de la corrosión. Estos proporcionan resistencia al desgaste, alta conductividad eléctrica, buena capacidad de soldado, y alta o baja capacidad de reflexión a la luz.

El níquelado y el cromado proporcionan resistencia al desgaste; la plata y el cobre son los mejores para conductividad eléctrica; la plata, el cobre, el estaño y el cadmio mejoran la capacidad de soldado; y el cromo y el rodio tienen gran resistencia al manchado.

Los revestimientos de zinc se utilizan sobre productos de hierro y acero que requieren protección contra la corrosión principalmente. Los revestimientos de cadmio se emplean como sustitutos para revestimientos de zinc, pero no son tan buenos cuando se exponen a la aire libre. Los revestimientos de níquel se utilizan principalmente como base de revestimiento para cromo, plata, oro y rodio.

El proceso de alear acero con aluminio por difusión se llama calorizado. El acero puede enlazarse con níquel, níquel-cromo o aleaciones de níquel-cobre. A parte de la resistencia contra la corrosión, el enlazamiento se hace algunas veces para obtener una combinación de propiedades no disponibles mediante cualquier otro método.

El acero inoxidable puede experimentar corrosión uniforme y localizada, esta tiene lugar al exponer este metal en un medio reductor. El fenómeno corrosivo se pone en evidencia con cierta prontitud y de modo más o menos generalizado, a lo largo y ancho de toda la superficie expuesta.

En estas condiciones las capas de óxido crómico se reducen y desaparecen el efecto barrera de la pasividad de la acero inoxidable. Entonces tiene lugar la corrosión de hierro elemental mayoritario del acero inoxidable y el aspecto gris- metálico más o menos brillante que caracteriza

esta aleación, se convierte en un material oscuro y muy quebradizo, características propias del enlace iónico del óxido de hierro

Este tipo de corrosión ocurre cuando el acero inoxidable se introduce en un horno a elevada temperatura en una atmósfera de hidrógeno, monóxido de carbono y sulfato de hierro. De este modo desaparece la pasivación. Como se explica en la siguiente tabla, cuando las condiciones son propicias se oxida el hierro base.

Tabla 3:
Serie galvánica de metales y aleaciones en agua de mar.

Extremo anódico (corroído)
Magnesio
Zinc
Aluminio
Cadmio
Aleación de aluminio
Acero al bajo carbono
Acero aleado
Hierro fundido
Acero inoxidable (activo)
Metal <u>munz</u>
Latón amarillo
Latón al aluminio
Latón rojo
Cobre
Bronce al aluminio
Aleaciones cobre- níquel
<u>Monel</u>
Níquel (pasivo)
<u>Inconel</u>
Plata
Acero inoxidable (pasivo)
Titanio
Oro
Platino

Extremo catódico (protegido)

Fuente: The International Nickel Company, Avner. (p.582, 1966)

También ocurre corrosión generalizada, en los aceros inoxidables al sumergirlos en ácido clorhídrico, sobre todo si se trata de una disolución aireada o que contiene iones oxidantes. Otro ácido agresivo para los aceros inoxidables es el ácido fórmico.

La existencia de monóxido de carbono en el ambiente, a elevada temperatura, convierte los óxidos de cromo en carburos de cromo, termodinámicamente más estables. La existencia de sulfuros, en estos casos genera una capa de sulfuro de cromo bajo la capa protectora de dióxido de tricromo. El crecimiento de la primera capa ocasiona la descohesión y la rotura de la segunda.

2.1.3.1 Corrosión por erosión

En algunos casos, la película protectora, del acero inoxidable se puede llegar a destruir por el efecto erosivo de algún fluido (Líquido refrigerante, transporte de líquidos, etc.). Evidentemente que este fallo solo se produce a consecuencia de un mal diseño o un imprevisto. Si el líquido es oxidante se vuelve a generar la capa protectora, pero en caso contrario se origina una pila galvánica entre la capa protectora (cátodo) y la zona desgastada (ánodo) creándose una picadura más o menos ancha como se aprecia en la figura 3.

Figura 3: Corrosión por erosión



Fuente: Pere. M. S, (p.64, 1989)

Se trata de un ataque de forma no cinemática, en el sentido de que avanza según el sentido de la dirección del fluido.

La apariencia de estas picaduras originadas por corrosión erosiva son inconfundibles: se trata de corrosión localizada en zonas grandes, que se detectan a simple vista con contornos algo suaves, propios del desgaste sin la existencia de restos de productos de corrosión, se trata de picaduras producidas por erosión de leche, agua y líquido de saneamiento, pasta de pasta, productos alimentarios en estado pastoso y otros.

Cuando la rotura de la película pasivante del acero inoxidable se debe a las implosiones de las burbujas de vapor, entonces este tipo de corrosión se denomina cavitación. La dureza el acabado superficial son factores que mejoran considerablemente la resistencia a la cavitación, pero es muy importante un buen diseño de la instalación.

2.1.3.2 Corrosión bajo tensión

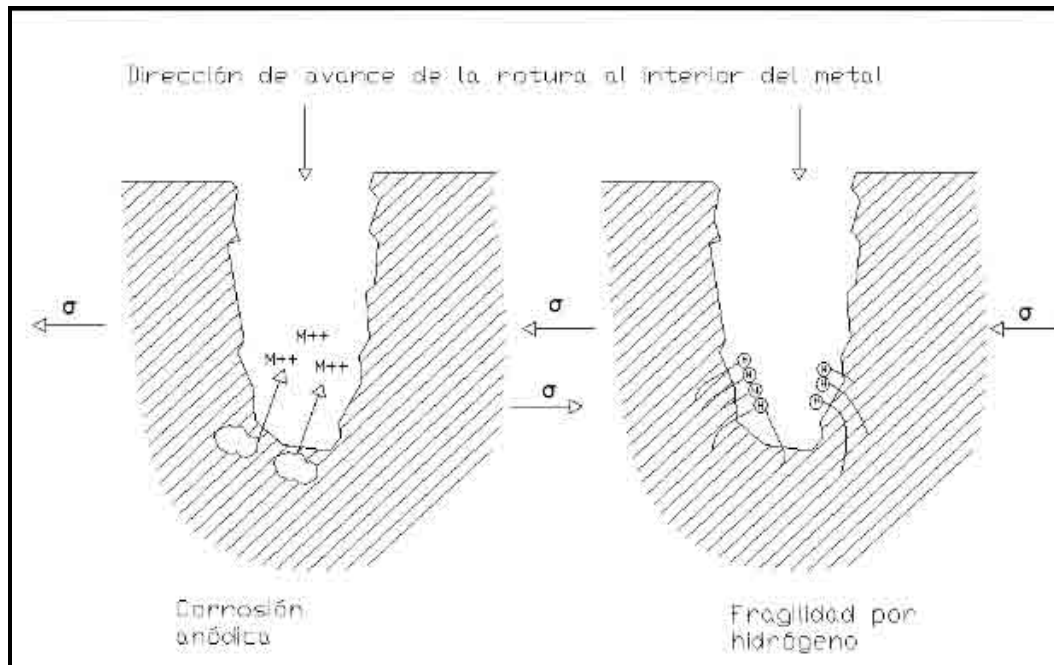
Este tipo de corrosión se produce cuando el sustrato está sometido a un medio corrosivo específico y a un esfuerzo del 10% al 70% del valor de su límite elástico. En el caso del acero inoxidable austenítico, el medio corrosivo para que tenga lugar este tipo de corrosión debe de ser de cloruros o alcalinos; en el caso de los aceros inoxidables ferríticos el medio corrosivo debe ser en soluciones básicas.

Este tipo de corrosión se caracteriza por picaduras muy localizadas y por su elevada velocidad de propagación. En presencia de cloruros la corrosión de la acero inoxidable austenítico es

transgranular, mientras que en un medio alcalino la corrosión del acero inoxidable ferrítico es de tipo intergranular.

El mecanismo de corrosión bajo tensión es de nucleación y crecimiento, o de formación y propagación. El inicio de una grieta y su posterior crecimiento depende del medio ambiente, de la microestructura del metal y de las tensiones existentes.

Figura 4:
Corrosión bajo tensión



Fuente: Pere. M. S, (p. 66, 1989)

La nucleación de esta grieta se interpreta combinando causas mecánicas y electroquímicas, una vez iniciada, la grieta se propaga por un lado, por disolución anódica del fondo de la grieta, que se halla desprovisto de la capa pasivamente de la superficie del acero inoxidable y por otro lado, debido a la concentración de esfuerzos existentes en el fondo de la grieta, lo que dirige su rápido crecimiento en dirección perpendicular a la tensión mecánica aplicada.

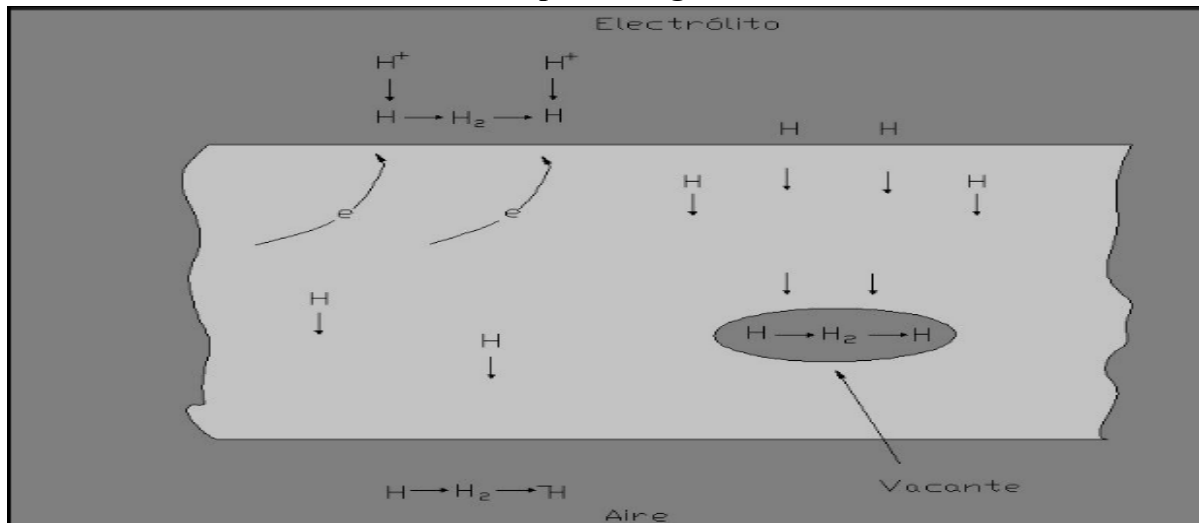
Si el medio es ácido el hidrógeno atómico se difunde a través de las zonas más afectadas por la concentración de tensiones.

2.1.3.3 Corrosión por hidrógeno.

En los aceros inoxidables martensíticos y los aceros inoxidables endurecidos por precipitación y expuestos en medios de sulfatos se produce el agrietamiento por hidrógeno que en parte tiene un mecanismo muy parecido al de corrosión bajo tensión. El ion sulfato favorece la reducción de los iones hidrógeno que se transforma en átomos de hidrógeno. Estos se absorben en la superficie del acero inoxidable y después se absorben en su interior a través de límites de grano, de dislocaciones y de límites de fase, para que cambien de coherentes a incoherentes.

Los átomos de hidrogeno al llegar a una zona con defectos de red, al encontrar espacio, se convierten en moléculas no metálicas y estas ejercen presión creciente, hasta originar verdaderas grietas.

Figura 5:
Corrosión por hidrogeno



Fuente: Pere. M. S, (p.66, 1989)

2.1.3.4 Corrosión intercrystalina

La corrosión intercrystalina aparece cuando se forman compuestos en los principales límites de grano como ya se ha dicho, los principales compuestos son carburos. Este inconveniente se puede evitar eliminando la mayor cantidad posible de carbono de la acero o bien añadiendo elementos con mayor afinidad para con el carbono que con el cromo.

Lo cual ocurre a elevadas temperaturas, por ejemplo en los aceros inoxidables refractarios de muchas horas de servicio a temperaturas próximas entre los 800° y 850° C. También se facilita la aparición de la citada fase intermetálica con la segregación de cromo en la matriz del acero. La morfología de la fase sigma, que fragiliza al metal base, es completamente distinta de los carburos, que suelen ser esféricos, además esta fase puede no aparecer en los límites de grano ya que ahí generalmente se disminuye el porcentaje de cromo.

2.1.3.5 Corrosión por fricción

Pere.M.S señala que existen dos mecanismos de corrosión por fricción, la corrosión con desgaste y el desgaste con corrosión. Las condiciones para que ocurran estos tipos de corrosión es que las superficies a corroer estén sometidas a fricción en un medio agresivo. En el primer caso las zonas de contacto entre las superficies, son zonas elevadas de acritud, las cuales se corroen y en el segundo caso el movimiento relativo de las dos superficies destruye los productos de corrosión para que el desgaste continúe. Cuando la fricción entre superficies es de cierta magnitud, el deslizamiento relativo produce detritos (sobras) por efecto mecánico. Estos detritos, si el medio

es agresivo, experimentan con relativa facilidad el fenómeno de corrosión. Se trata del desgaste con corrosión.

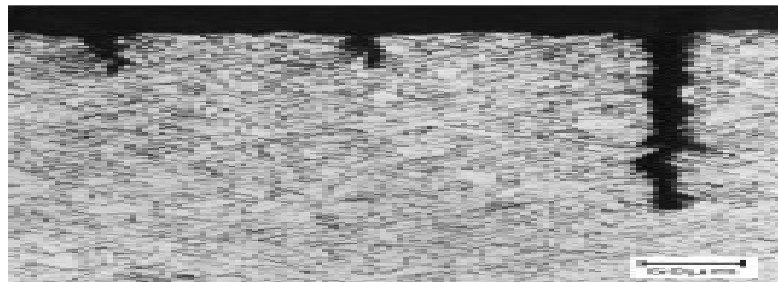
Los aceros inoxidables austeníticos y ferríticos tienen generalmente mayor resistencia a la corrosión por desgaste. En cambio, los aceros inoxidables endurecidos por precipitación tienen una resistencia a la corrosión inferior, en términos generales, con respecto a los aceros inoxidables. Sin embargo, encuentran ocasiones en los que se usan por su elevada resistencia a la fricción, sobre todo cuando el mecanismo de fricción es de desgaste con corrosión.

2.1.3.6 Fatiga con corrosión

La condición necesaria para que exista fatiga con corrosión es que el acero inoxidable es sometido a esfuerzos alternos de compresión y tracción en un medio corrosivo. En estas condiciones, el límite de fatiga mencionado desaparece o disminuye considerablemente. La apariencia de las muestras metálicas que han experimentado fatiga con corrosión es muy característica: se aprecia una zona rota reciente y otra zona corroída como se puede ver en la siguiente figura.6.

Figura 6:

Corrosión por fatiga, fisura perpendicular a la superficie, en la cara exterior de un tubo de acero.



Fuente: Pere. M. S, (p.69, 1989)

Los aceros inoxidables se caracterizan por su elevada resistencia a la fatiga con corrosión, puesto que el cromo aumenta considerablemente el límite de fatiga en medios corrosivos sin embargo, los aceros inoxidables con tratamientos, tienen riesgo de experimentar este tipo de fallo, sobre todo si el medio propicia estos. Por ejemplo, en una chapa recocida de acero con un 14.56% Cr y un 0.38% C presenta una relación de fallo (límite de fatiga con corrosión dividido por límite de resistencia) de 0.69% en agua salada, mientras que la chapa templada y revenida (bonificada), de la misma composición química y expuesta en las mismas condiciones, tiene un límite de fallo 0.51% si el medio ambiente es agua potable la relación de fallo no se altera, con el tratamiento térmico es de: aproximadamente de 0.69%.

2.1.3.7 Corrosión por aireación diferencial

La corrosión por aireación diferencial también es un ataque localizado. Tiene lugar en el interior de grietas superficiales, en el fondo de salpicaduras de barro, en superficies atornilladas o remachadas, en la zona del acero inoxidable donde se han incrustado animales marinos, etc.

La zona del acero donde el oxígeno llega con más dificultad actúa de ánodo de la pila galvánica de corrosión, mientras que el resto de la superficie del acero inoxidable, que permanece en contacto directo con el medio exterior, actúa como cátodo de la pila galvánica.

2.2 Prevención de la corrosión

Por último, Peré, (p.70, 1989) señala algunas formas de prevenir los diferentes tipos de corrosión en aceros inoxidables, y menciona que la corrosión por erosión puede prevenirse con un diseño adecuado, escogiendo convenientemente la composición de los fluidos, así como la composición del acero: los aceros austeníticos y los endurecidos por precipitación suelen presentar buena resistencia a la corrosión.

En la corrosión bajo tensiones se contribuye a disminuir su intensidad eliminando el estado superficial del acero, modificando el diseño, que concentra esfuerzos en una zona aplicando técnicas de protección como por ejemplo la protección catódica. La agresividad del medio disminuye rebajando el porcentaje de cloruros, el pH, la concentración de sales amoniacales, etc.

Las tensiones residuales introducidas en el acero inoxidable se eliminan mediante recocidos (tratamiento térmico). El estado superficial del acero inoxidable más idóneo para resistir este tipo de corrosión es después de granallado con perdigones de acero inoxidable, no debe soldarse algunos tipos de acero inoxidable con diferentes coeficientes de dilatación.

La protección catódica consiste en conectar el acero inoxidable que se quiere proteger al cátodo de un generador de corriente continua que tenga un potencial adecuado y un ánodo auxiliar. También se puede proteger catódicamente uniendo el acero inoxidable a un metal más activo, que actúe de ánodo de sacrificio. Mientras exista ánodo para sacrificar, el acero inoxidable se mantendrá protegido.

La dureza de los aceros inoxidables, tanto la conseguida por el temple como la alcanzada por hechurado en frío, es inversamente proporcional a la resistencia a la corrosión por hidrógeno. Este tipo de corrosión depende de la agresividad del medio, por ejemplo nivel de contaminación por sulfuros.

La corrosión intercrystal. Se previene por tratamiento térmico del acero bajo en carbono. Por estabilización calentando a 650/800°C se precipitan los carburos de cromo existentes y así se consigue la homogenización del sustrato. Este tipo de corrosión se evita mediante la adición de elementos estabilizadores.

Basta adiciones pequeñas de titanio y niobio, los cuales forman carburos más fácilmente que el cromo, para impedir el empobrecimiento en cromo de los aceros inoxidables. Los carburos de titanio y niobio se forman en el intervalo de temperatura de 870/1,150 °C, dejando un porcentaje mínimo de carbono en disolución sólida, impidiéndose la precipitación de carburo de cromo en cantidades apreciables.

Entre los aleantes conviene destacar que el nitrógeno y el molibdeno permiten un contenido de carbono superior. En cambio, un aumento del contenido de níquel obliga a rebajar el porcentaje de carbono.

Los aceros inoxidable austeníticos resisten mejor la corrosión por aireación diferencial que los ferríticos y martensíticos, por su contenido de níquel. El molibdeno es el aleante que aumenta más eficazmente la resistencia a este tipo de corrosión, por ello, en medios clorurados, el acero AISI 316 es el más resistente de los aceros inoxidables comunes.

2.3 Características importantes que separan al acero inoxidable de los otros aceros.

Todos los aceros inoxidables contienen el cromo suficiente para darles sus características de inoxidables. Muchas aleaciones inoxidables contienen además níquel para reforzar aún más su resistencia a la corrosión. Estas aleaciones son añadidas al acero en estado de fusión para hacerlo "inoxidable en toda su masa". Por este motivo, los aceros inoxidables no necesitan ser ni chapeados, ni pintados, ni otro tratamiento superficial para mejorar su resistencia a la corrosión. En el acero inoxidable no hay nada que se pueda pelar, ni desgastar, ni saltar y desprenderse.

También los aceros inoxidables se oxidan, pero en vez de óxido común, lo que se forma en la superficie es una tenue película de óxido de cromo muy densa que constituye una coraza contra los ataques de la corrosión. Si se elimina esta película de óxido de cromo que recubre los aceros inoxidables, se vuelve a formar inmediatamente al combinarse el cromo con el oxígeno de la atmósfera del medio ambiente, por este motivo mencionamos este fenómeno físico ya que se presenta de manera muy común en este tipo de aceros.

2.4 Oxidación

Tomas de Galiana dice que la oxidación se puede entender cómo, la formación de óxido (capa rojiza y pulverulenta que se forma en la superficie de los metales ferrosos corroídos por la humedad), en la superficie de los metales. Esta se presenta por la acción oxidante del oxígeno del aire, atendiendo a la importancia de las combustiones que entretiene o permite, el oxígeno del aire lo podemos considerar como el principal oxidante. Otros elementos de gran importancia en la oxidación son: el cloro, el bromo y otros halógenos; los ácidos nítrico y sulfúrico, el permanganato de potasio, los cromatos alcalinos, los cloratos, nitratos y otras sales.

Khanna señala que para el caso de la aleación Fe-Cr el vapor de agua ($O_2 + 2\%H_2O$) disminuye la formación del óxido de cromo que ayuda al metal a protegerse contra la corrosión, por lo cual se requiere una mayor cantidad de cromo en los aceros cuando esté presente el vapor de agua en las temperaturas de trabajo.

Rowley utilizó espectroscopia por pérdida de energía de electrones en óxido que se formaron en tres minutos a 873K, donde reporta presencia de una formación dúplex de Fe_2O_3 y $FeCr_2O_4$. El primero con una estructura romboédrica, y el segundo no lo menciona el autor. Señala que

cuando un oxido interviene un metal de transición sucede la hibridación en los niveles 2p de l oxígeno sin ocupar el nivel 3d del metal de transición.

Suzuki caracterizó la película en las láminas de Fe-Cr y reporta una serie de análisis que obtuvo con difracción de rayos x monocromáticos. Encontró que los aceros a 600 °C que no tiene alto cromo (0.02%) formaron dos películas de óxido de hierro; la primera de FeO y la segunda Fe₃O₄. Los aceros ferríticos Fe-Cr exhiben tres diferentes modos de oxidación a altas presiones de CO₂. Robertson reportó este aspecto después de analizar los efectos que trae consigo el Si. El acero bajo en Si generalmente se oxida de acuerdo a una curva parabólica creciente, formando una costra de magnetización e endurecimiento con una capa morfológica doble (dúplex) a temperaturas más altas. Sin embargo, tales aceros son susceptibles a una forma de oxidación rápida conocida como aceleración brusca de la corrosión (break away), la cual sigue un comportamiento lineal y proporciona la presencia de poros.

Con altos contenidos de Si la oxidación se vuelve extremadamente lenta, de tal manera que el metal queda protegido inhibiendo la corrosión. La característica anterior hace que el diseño de estos aceros ferríticos contenga silicio cuando van a ser usados en operaciones a alta temperatura.

Los aceros que tienen más de 14% de Cr favorecen la oxidación selectiva de Cr y estabiliza una costra base de cromo a expensas de un crecimiento rápido de una costra base de cristalización. Consideremos una aleación binaria A-B en la cual B es menos noble; esto es, su óxido BO es más estable que OA y, por tanto, el grado de crecimiento de BO es mucho menor que el de AO (por ejemplo: A=Fe, B=Cr).

Durante la fase inicial o transitoria de oxidación ambos, tanto el AO como el BO, nuclearán sobre la superficie de la aleación y la capa tendrá un crecimiento rápido en su grosor debido al predominio de AO. Puesto que BO es estable a bajas presiones parciales de oxígeno P_{O₂}, BO tenderá a formar una interface preferentemente en la costra de la aleación y también se formara como un precipitado dentro de la aleación. Si las partículas BO pueden extenderse lateralmente y formar una capa continua, controlaran el subsecuente grado de oxidación de la aleación y la reducirán a la de BO. Si el tiempo de transformación es largo (como tiende a ser con el Cr), entonces BO existirá como una subcapa. Esta situación ha sido extensamente analizada por Wagner (pp.5, 751, 1965) et al.

Esta teoría convencional de oxidación selectiva ha sido aplicada por Atkinson al sistema Fe-Si-Cr en el cual el cromo actúa como un agente limpiador secundario en el proceso metalúrgico, reduciendo la solubilidad del oxígeno sobre la costra principal. Por eso se ha pensado que el comportamiento de la cobertura de Cr y Si en los aceros estudiados incluye un sinergismo más complicado que el que se puede inferir de los modelos que tienen un agente limpiador secundario en el proceso metalúrgico.

Bajo el análisis de la formación de películas de óxido protector en aleaciones binarias; el acero bajo en silicio generalmente se oxida de acuerdo a una curva parabólica creciente, formando una morfología de doble película de magnetita o espinel. Esta condición de silicio en los aceros, hace que cuando estos son sometidos a altas temperaturas se oxiden rápidamente (aceleración brusca de la corrosión “break away”). Este proceso por consiguiente, sigue en comportamiento igual al de una película de óxido con poros.

Los altos contenidos de silicio generan una oxidación extremadamente lenta, que hace que el metal se proteja contra la corrosión. Por lo anterior, los aceros ferríticos, para resistir oxidación a altas temperaturas de operación son diseñados metalúrgicamente con estas características.

El Cr y el Si generan la resistencia a la corrosión con Cr_2O_3 y SiO_2 , respectivamente; sin embargo, su modo de actuar es un tanto diferente: en los óxidos de Fe y Cr tienden a ser mezclados con una presión parcial de oxígeno P_{O_2} . En otras palabras, los óxidos de hierro y silicio no se mezclan y debido a que el óxido de silicio se encuentra entre el metal y los otros óxidos, se forma una barrera de difusión que inhibe la formación posterior de los otros óxidos.

2.4.1 Oxidación del cromo

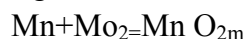
En los aceros inoxidables, la película del óxido de cromo es fundamental (el cromo confiere resistencia a la oxidación de hierro y del níquel). Sobre este metal se forma una película de Cr_2O_3 , la cual es estable con una pequeña fracción libre de defectos.

2.4.2 Oxidación de los aceros inoxidables

Los metales pueden reaccionar con el oxígeno, produciendo un óxido en la superficie, destacando tres aspectos de la reacción, la facilidad con que se oxida el metal, la naturaleza de la película que se forma, y la velocidad con que ocurre este fenómeno químico.

La facilidad con que ocurre la oxidación está dada por la energía libre de formación para este óxido. El tipo de película determina la rapidez a la que ocurre su formación y hace que el metal sea pasivo. Se observan tres tipos de comportamiento, dependiendo de los volúmenes relativos del óxido y del metal.

Puede determinarse la relación óxido-metal a partir de la ecuación de Pilling-Bedworth para la siguiente reacción de oxidación.



La relación de Pilling-Bedworth (P-B) marca la proporción entre el volumen de óxido por átomo de metal, con respecto al volumen de metal por átomo.

$$(P - B)^n = \frac{(M_{oxido})(\rho_{metal})}{n(M_{metal})(\rho_{oxido})}$$

m= masa atómica o molécula

ρ = densidad

n= número de átomos de metal en el óxido

Si el valor de la relación $(P-B)=1$ Los volúmenes de óxido y metal son casi iguales, formando una capa protectora no porosa y adherente típica del aluminio y el cromo; si es menor a uno el óxido ocupa un volumen menor que el del metal y si es mayor a uno ocurrirá lo contrario. Mientras esto ocurra seguirá aumentando el grosor de la capa de óxido hasta lograr dejar expuesto al metal.

2.4.3 Influencia de la temperatura

En los fenómenos de corrosión también tiene gran importancia la temperatura del metal o del medio ambiente en que se encuentra. Así, por ejemplo, si una superficie limpia y brillante de hierro se expone a la acción del aire o del oxígeno bien seco a la temperatura ambiente continua brillante indefinidamente.

En cambio si la temperatura se eleva 200°C , la superficie adquiere un color amarillo luego al aumentar la temperatura se va modificando el color hasta que a 300°C es azul. A 400°C la película superficial tiene un color gris variable y opaco, y a 600°C la película de óxido aparece rápidamente. Con luz blanca estos colores en el hierro y en los aceros suelen recibir el nombre de colores de revenido, pueden ser utilizados para tener una idea y hasta para calcular el espesor de la película de óxido superficial.

2.4.4 Composición de la capa de óxido que se forma sobre la superficie de los aceros a elevadas temperaturas

El hierro al oxidarse dice Apraiz (p.431, 1982) puede formar uno de los tres óxidos Fe_2O_3 , Fe_3O_4 y FeO , que en proporciones diferentes, según los casos, aparecen formando la cascarilla superficial y al ser calentados los aceros a elevadas temperaturas. En general el Fe_2O_3 y el Fe_3O_4 no suelen presentarse libres sino que suelen aparecer cristales mixtos con el hierro y también aparecen formando cristales mixtos de estos óxidos.

El óxido ferroso se suele presentar a elevada temperatura (700° - 1400°C), formando wustita⁴. A temperaturas inferiores a 575°C , tanto el óxido ferroso como la wustita no permanecen estables y en el enfriamiento se descomponen en cristales de óxido ferroso-ferrítico y hierro.

La cascarilla producida a temperaturas superiores a 650°C suele estar formada por una capa exterior relativamente delgada Fe_2O_3 y otra más gruesa en el interior formada por cristales de Fe_3O_4 y de hierro (que proviene del desdoblamiento de wustita formada a elevada temperatura), la composición de esta capa es variable y más rica en hierro a medida que se acerca hacia el interior de las piezas. Esta cascarilla es compacta, adherente difícil de remover por decapado.

⁴ (Que son cristales mixtos formados por óxido ferroso y óxido ferroso-ferrítico)

Capítulo III

Los aceros dúplex y algunos casos prácticos

Los aceros inoxidables dúplex son típicamente el doble de fuerte que los aceros inoxidables austeníticos comunes. La expansión térmica de los tipos dúplex es intermedia a la de aceros al carbono y aceros inoxidables austeníticos. La conductividad térmica de los aceros inoxidables dúplex también es intermedia a la de los aceros al carbono y los aceros inoxidables austeníticos. Los aceros inoxidables dúplex presentan dos fases: dispersión de austenita fcc en una matriz de ferrita bcc. La cantidad exacta de cada fase está en función de la composición y el tratamiento térmico. Los principales elementos de aleación son el cromo y el níquel, sin embargo la cantidad de níquel es insuficiente para desarrollar la estructura cristalina austenítica. El contenido de cromo varía del 18 al 26%, y el contenido de níquel del 4.5 al 6.5%. La adición de elementos como el nítrógeno, molibdeno, cobalto, silicio y tungsteno, permite controlar el balance en la configuración metalográfica, así como impartir ciertas características de resistencia a la corrosión.

A lo largo de este capítulo describimos algunos casos donde se utiliza el acero inoxidable dúplex (Dúplex Stainless Steels); en los que se abordan temas referentes a soldadura, corrosión, y propiedades mecánicas que hacen del (DSS), una buena opción para el desarrollo de la industria, demostrando mejores propiedades que otros tipos de aceros inoxidables.

3. Clasificación de los aceros dúplex.

Es difícil establecer una clasificación precisa y completa para todos los tipos de acero existentes. Más difícil aún, es establecer una equivalencia exacta entre los aceros de diferentes denominaciones, ya que la clasificación de todos estos metales en normas cambia según el país de origen. El “Compendio de Normas para Productos de Acero”. En su Tercera Edición establece en la tabla número 4 algunos ejemplos que maneja el sistema UNS para los aceros inoxidables dúplex en su composición química.

Tabla 4:
Porcentaje de composición química de algunos aceros dúplex de la serie UNS

UNS Numero	Nombre Común	Composición (%)							Mn	Si	P	S
		Cr	Ni	C	Mo	N	Cu	W				
S32900	329	23- 28	2.5 - 5	0.20	1-2				1.0	0.75	0.040	0.030
S31200	44LN	24- 26	5.5 - 6.5	0.03	1.2- 2	0.14			2.0	1.0	0.045	0.030
S31803	2205	21- 23	4.5 - 6.5	0.03	2.5- 3.5	0.08- 0.2			2.0	1.0	0.030	0.020
S39274	DP-3W	24- 26	6- 8	0.03	2.5- 3.5	0.24- 0.32	0.2- 0.8	1.5- 2.5	1.0	0.8	0.030	0.020
S32550	Ferr. 255	24- 27	4.5 - 6.5	0.04	2-4	0.1- 0.25	1.5- 2.5		1.5	1.0	0.040	0.030
S32750	SAF 2507	24- 26	6- 8	0.03	3-5	0.24- 0.32			1.2	0.8	0.035	0.020
S32760	Zeron 100	24- 26	6- 8	0.03	3-4	0.2- 0.3	0.5- 1	0.5- 1	1.0	1.0	0.030	0.010

Fuente: Robert M. Kain, Duplex Stainless Steel (p.627, 1997)

En el caso de los aceros al Carbono comunes, los sistemas usuales de clasificación –SAE, AISI, COPANT, DIN, etc.- cubren apenas aquellos aceros hasta un porcentaje de Carbono del 1%.

En el caso de los aceros aleados, la elaboración de sistemas de clasificación es más complicada aún, debido al constante nacimiento de nuevos tipos de aceros, con la presencia de nuevos elementos de aleación. Aun así, para los tipos más comunes de aceros y las cantidades relativamente bajas de elementos aleantes, tanto la SAE, AISI y otras asociaciones técnicas, elaboraron sistemas de clasificación que se aplican a dichos materiales según sus características físicas, químicas o aplicación.

Una de las clasificaciones por composición química más generalizadas, corresponde a la empleada por la American Iron and Steel Institute – AISI y la Society of Automotive Engineers – SAE.

El sistema de numeración unificado, en inglés unified numbering system (UNS), es una aleación de sistema de designación ampliamente aceptada en América del Norte. Se compone de una letra prefijo y cinco dígitos indican una composición de material. Por ejemplo, un prefijo de S indica aleaciones de acero inoxidable, C indica el cobre, latón, o aleaciones de bronce, T indica aceros para herramientas, y así sucesivamente. Los 3 primeros dígitos que se observan coinciden con sistemas de numeración de 3 dígitos de mayor edad, mientras que los 2 últimos dígitos indican variaciones más modernas. Por ejemplo, la aleación de cobre No. 377 (latón forjado) en el sistema de 3 dígitos originales se convirtió C37700 en el Sistema UNS. La UNS es administrada conjuntamente por la ASTM y SAE. Un número de UNS solo no constituye una especificación de material completo, y a que no establece requisitos para las propiedades del material, tratamiento térmico, la forma o la calidad.

Tradicionalmente se manejaban los aceros inoxidables 304 L Y 316 L, los cuales respondían adecuadamente para la época y eran considerados de la serie 300. Ante agentes como los cloruros, estos tenían problemas de adelgazamiento como resultado del fenómeno de corrosión. Sin embargo para disminuir el problema de adelgazamiento en digestores que manejan cloruros, se ha encontrado una mejor respuesta con el empleo de los aceros tipo S31200 (dúplex) según investigaciones de Creust- Loire Industries.

3.1 Normatividad para los aceros dúplex UNS

Con base en la información obtenida de las memorias de la 5° conferencia mundial de los aceros inoxidables, presentamos una compilación de características y aplicaciones que guardan en particular algunos de los aceros inoxidables dúplex.

Características generales del (UNS S 31803): Es un acero inoxidable dúplex equivalente al acero A182 F51 (1.4462), siendo una aleación austenítica, ferrítica de níquel cromo hierro con la adición de molibdeno. Diseñada para combinar una resistencia mejorada a la fisuración por corrosión bajo tensión, fatiga y oxidación de uniones, el cual tiene aproximadamente el doble de resistencia que cualquier otra aleación de acero inoxidable austenítico normal. Como material dúplex, UNS S31803 ofrece los beneficios de una alta resistencia a la tensión y a la corrosión, además de una expansión térmica baja, conductividad térmica más alta que los aceros austeníticos, alta absorción de energía y excelente maleabilidad y soldabilidad.

Aplicaciones: Los usos de la aleación UNS S 31803 incluyen bridas de tuberías de acero de aleación laminado o forjado, principalmente para el sector petroquímico, accesorios y válvulas forjadas para aplicaciones de alta temperatura, termocanjeadores, tanques químicos, refinerías, piezas de compresores para plantas de desalinización de agua del mar y piezas para recipientes a presión para el sector offshore (es un término del idioma inglés que literalmente significa “en el mar, alejado de la costa”).

Características generales Grado 17-4 (UNS S 17400): Este acero inoxidable es el acero más utilizado con un alto grado de endurecimiento por precipitación. Tiene una alta resistencia, fuerza y resistencia a la corrosión. El S 17400, se puede soldar usando la fusión común y métodos de soldadura por resistencia. El Método de soldadura de oxiacetileno no se recomienda para la soldadura de esta aleación.

Aplicaciones: se utiliza en las siguientes aplicaciones: reactor nuclear, turbinas de aviones y de gas, campos petrolíferos, componentes de procesos químicos, fábrica de papel y otros.

Características generales (UNS S32154): Es un acero inoxidable austenítico súper dúplex con un 6 % de molibdeno, ampliamente utilizado en condensadores para centrales eléctricas refrigeradas por agua de mar.

El primer acero inoxidable austenítico de alto rendimiento específicamente diseñado para utilizar nitrógeno que le confiere mayor resistencia a la corrosión, tiene una resistencia superior al

desgaste del cloruro, oxidación de uniones y fisuración por corrosión bajo tensión, sobre todo en agua que contiene cloruro.

Aplicaciones: UNS S31254 incluyen tubos condensadores, tubos de intercambiadores de calor, vaina de tubos y tuberías de agua de servicio en centrales nucleares.

Características generales (UNS S32750): Es la calidad súper dúplex más común, equivalente a A182 F53, que combina una alta resistencia a la tensión y a los impactos, con un coeficiente bajo de expansión térmica y alta conductividad térmica.

Los altos niveles de cromo (25%), molibdeno (4%) y nitrógeno ofrecen una resistencia excelente a la fatiga, oxidación de uniones y corrosión en general, lo que significa que la aleación UNS S32750 ha sido diseñada para sus usos en aplicaciones difíciles, que precisan una resistencia excepcional a la tensión y a la corrosión para trabajar en sustancias químicas, petroquímicas y plataformas en alta mar, así como equipos de agua salada.

Aplicaciones: S 32750 incluyen intercambiadores de calor, recipientes a presión, sistemas de lucha contra incendios, plantas de destilación, plantas de osmosis inversa de alta presión y tuberías de agua salada, torres de absorción, conductos y tuberías y sistemas de gases para el sector de la energía. También tiene excelentes propiedades mecánicas, lo que significa que puede utilizarse una calidad de menor peso para lograr la misma resistencia de diseño que una aleación de níquel más gruesa, lo que ahorra peso y costos de fabricación.

Características generales (UNS S32760): Es un acero inoxidable súper dúplex equivalente a A182 F55 con una microestructura austenítica y ferrítica 50:50. El alto contenido de cromo y molibdeno del súper dúplex hace que esta aleación sea extremadamente resistente a la oxidación uniforme tanto por ácidos orgánicos como inorgánicos, sobre todo aquellos que contienen cloruro. El contenido de molibdeno y cromo más alto que la media, además, confiere a esta aleación mayor calidad en cuanto a la resistencia térmica ya que también ha sido diseñada como una aleación de acero inoxidable súper dúplex con alta resistencia a la tensión y a la deformación, al desgaste, fuerte soldabilidad, resistencia a la fisuración por corrosión bajo tensión, oxidación de uniones, fatiga por corrosión y excelente dureza.

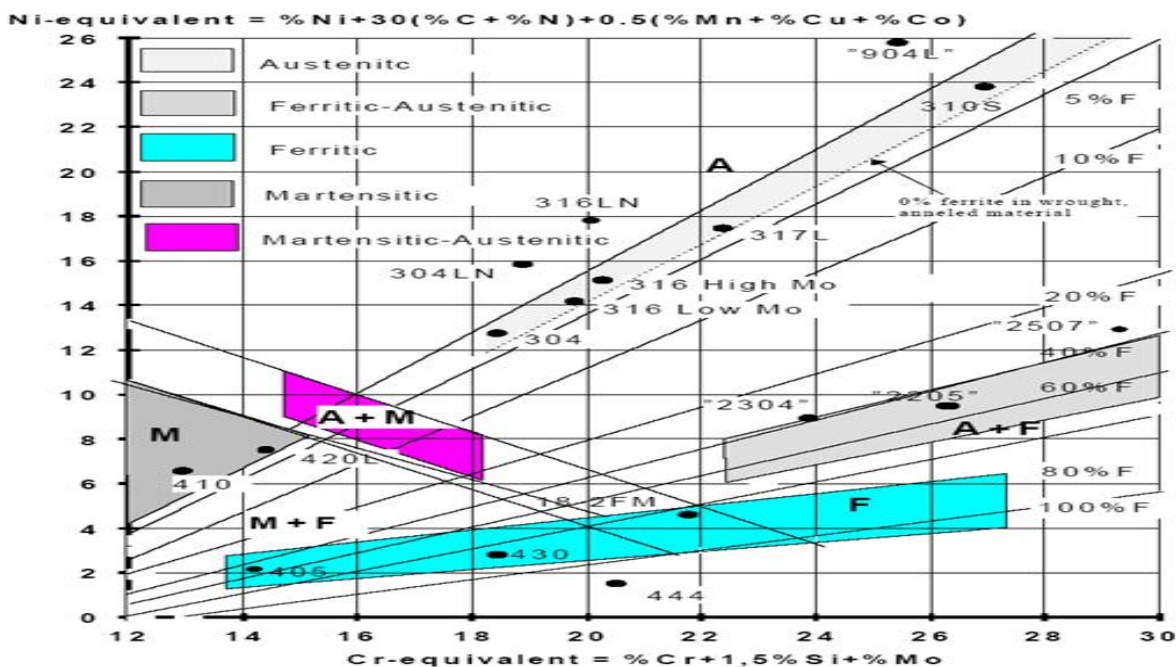
Aplicaciones: UNS S32760 se utiliza en la fabricación de equipos para el sector de petróleo y gas, plataformas offshore, termocanjeadores, procesamiento de materias químicas, recipientes a presión y calderas, además de en el sector petroquímico y plantas de destilación, incluyendo tuberías de agua salada.

3.2 Características mecánicas de los aceros dúplex

Comparados con los grados austeníticos, los aceros inoxidable dúplex presentan una resistencia considerablemente mayor al agrietamiento por corrosión de tensiones, (en inglés stress corrosión cracking), SCC, en soluciones de cloruro a expensas de una tenacidad, ductilidad y soldabilidad levemente menor. Más alta resistencia a la tracción y punto de fluencia con respecto a los aceros austeníticos y ferríticos, buena soldabilidad y maleabilidad, resistencia intermedia a la corrosión por fatiga inducida por cloruros, en tre los aceros austeníticos y ferríticos, resistencia a la corrosión general y por picadura, igual o mejor que la del tipo acero inoxidable 316L, en muchos ambientes corrosivos, resistencia a la corrosión intergranular, debido a bajo contenido de carbono, buena resistencia a la erosión y abrasión. Coeficiente de expansión térmica cercano al del acero al carbono, lo cual puede resultar en menores tensiones en las soldaduras que involucren aceros inoxidables dúplex con acero al carbono. Normalmente se utilizan en un rango de temperaturas entre -45 °C y 260 °C.

En el diagrama 8 se muestra las fases del acero inoxidable en las cuales observamos la martensítica, austenítica y ferrítica, así como los austeno-ferrítico que caracterizan a los aceros dúplex.

Diagrama 8
Fases del acero inoxidable dúplex

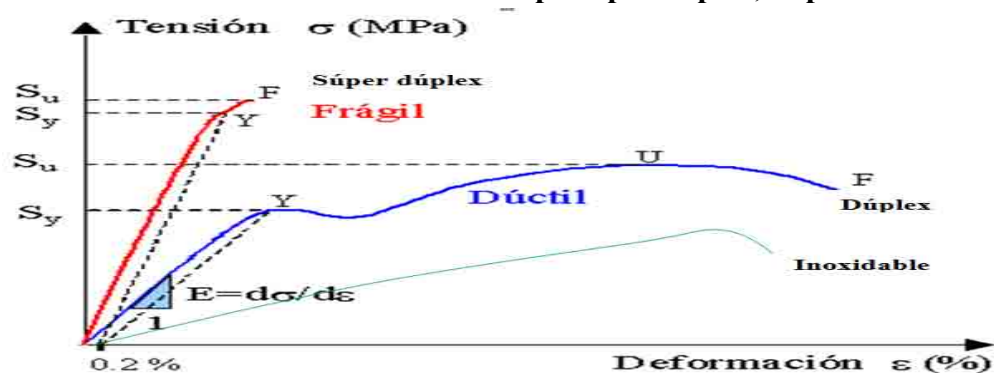


Fuente: www.scrigroup.com

En el diagrama 9 se muestra la tenacidad que presentan los aceros súper dúplex, dúplex e inoxidables dando como resultado una tenacidad superior de los aceros súper dúplex en comparación con los anteriores, esto nos muestra sus propiedades mecánicas las cuales son mejores en comparación con otros tipos de aceros inoxidables.

Diagrama 9

Esfuerzo deformación entre el acero del tipo súper dúplex, dúplex e inoxidable.



Fuente: Elaboración propia

Con base en lo establecido en el Compendio de Normas para Productos de Acero. Tercera Edición, los aceros inoxidables dúplex tienen propiedades mecánicas excepcionales en la tabla 5 se indican para los tipos de dúplex convencionales su límite elástico a temperatura ambiente en estado recocido de soldabilización, el cual es más del doble que los inoxidables austeníticos convencionales, sin nitrógeno. Esto permite al ingeniero de diseño reducir el espesor en algunas aplicaciones.

Tabla 5

Límites de propiedades mecánicas ASTM para chapa de acero inoxidable dúplex

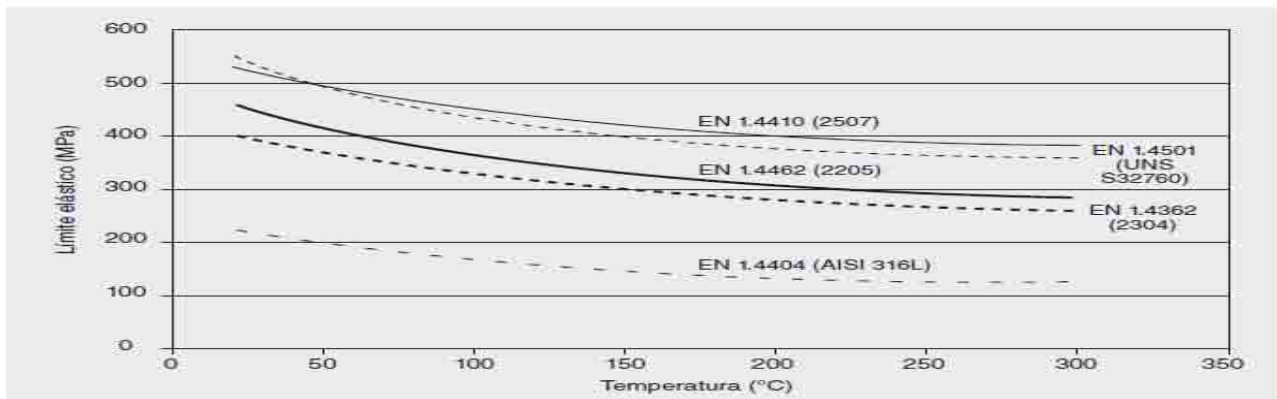
Tipo	UNS No.	ASTM	Carga de rotura MPa (ksi)	Límite de fluencia 0.2% MP(ksi)	Alargamiento en 2" %
2304	S32304		600(87)	25	1.4362
2205	S32205		655(95)	25	1.4462
2507	S32750		795(116)	15	1.4410

Fuente: Hernández, R.G. (p.23, 2012)

En el diagrama 10 se compara los límites elásticos típicos de varios inoxidables dúplex con el inoxidable austenítico EN 1.4404 (AISI 316L) entre la temperatura ambiente y 300°C (570°F) debido al peligro de fragilización a 475 °C (885°F) de la fase ferrítica, los inoxidables dúplex deben utilizarse en servicios a temperaturas por encima de las permitidas por el código de diseño de recipientes a presión aplicable durante periodos de tiempo prolongado.

Diagrama : 10

Comparación de límites elásticos de acero inoxidable duplex EN 1.4404 (AISI 316 L) entre temperatura ambiente y 300°C (572°F)



Fuente: Hernández, R.G. (p.23, 2012)

En el diagrama anterior también se compara el alargamiento mínimo en el ensayo de tracción para los aceros austeníticos convencionales y los aceros inoxidables dúplex.

Las propiedades mecánicas de los inoxidables dúplex forjados son muy anisotrópicas, es decir, pueden variar dependiendo de la orientación. Esta anisotropía se debe a los granos alargados y a la textura cristalográfica resultante del laminado en frío o en caliente. Si bien la estructura de solidificación de los inoxidables dúplex es típicamente isotrópica, se laminan o forjan con una deformación diferencial de las dos fases presentes. Que rebela la direccionalidad del procesamiento en donde la resistencia es mayor cuando se observa perpendicular a la dirección de laminación.

La tenacidad al impacto (resiliencia) es mayor cuando la entalladura es táp osicionada perpendicularmente a la dirección de laminación. La tenacidad más alta para una probeta Charpy se presenta “Longitudinal” (L-T) se consigue a las otras direcciones de ensayo. Normalmente la energía de impacto de una probeta transversal de una chapa de acero inoxidable dúplex será 0.5 a 0.66 con respecto a una probeta longitudinal.

Tabla 6
Comparación de la ductilidad de acero inoxidable duplex y austeníticos con los requisitos de ASTM A 240 y EN 10088-2

ASTM A 240			EN 10088-2			
UNS No.	Tipo	Alargamiento, mín. (%)	EN No.	Alargamiento, mín. (%)*		
				P	H	C
S32003		25				
S32101		30	1.4162	30	30	30
S32202		30	1.4062			
S32304	2304	25	1.4362	25	20	20
S32205	2205	25	1.4462	25	25	20
S32750	2507	15	1.4410	20	15	15
S30403	304L	40	1.4307	45	45	45
S31603	316L	40	1.4404	45	40	40

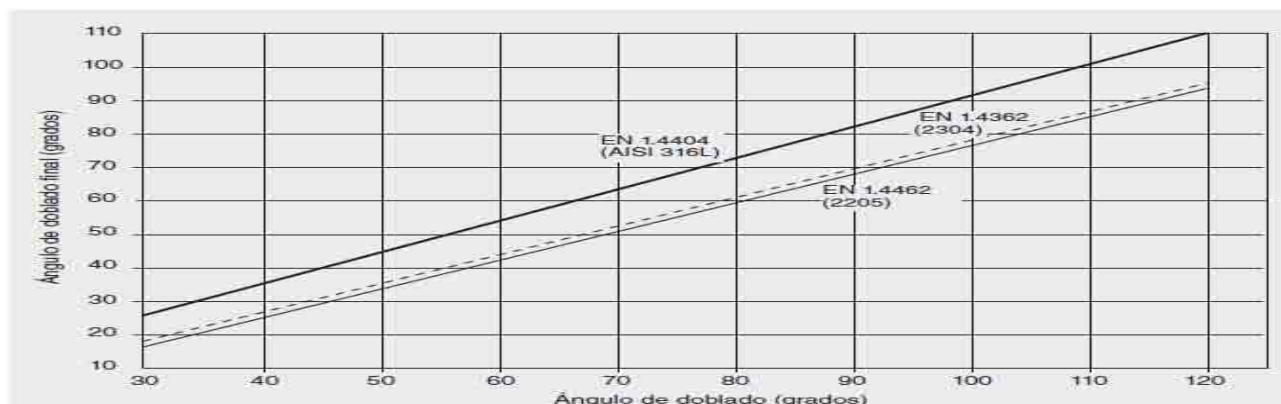
P = chapa gruesa laminada en caliente
H = bobina laminada en caliente
C = chapa y bobina laminadas en frío
* Dirección transversal

Fuente: Hernández, R.G. (p.24, 2012)

En la tabla 6 se comprueba el alargamiento mínimo en el ensayo de tracción para los aceros austeníticos convencionales y los inoxidables duplex.

A pesar de su elevada resistencia, los aceros inoxidables duplex tienen buena ductilidad y tenacidad. En comparación con los aceros inoxidables ferríticos, la transición dúctil- frágil es más gradual. Los aceros inoxidables mantienen buena ductilidad incluso a bajas temperaturas, por ejemplo -40°C; sin embargo, la ductilidad de los inoxidables duplex es, en general, menor que la de los inoxidables austeníticos. Los aceros inoxidables austeníticos normalmente no muestran una transición dúctil- frágil y mantienen una tenacidad excelente hasta temperaturas criogénicas.

Diagrama 11
Comparación de la recuperación elástica de los aceros duplex tipo EN 1.4404 (AISI 316L) en chapa de 2mm (0.08 pulgadas) de espesor.



Fuente. Hernández, R.G. Outkump(p.24, 2012)

Comparación de la recuperación elástica de aceros inoxidables duplex y del tipo EN 1.4404 (AISI 316L) en chapa de 2mm (0.08 pulgadas) de espesor. Los inoxidables duplex tienen menor

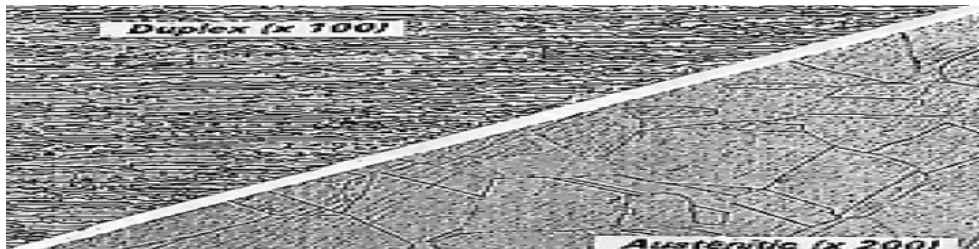
ductilidad que los inoxidables austeníticos y podría ser necesario aumentar el radio de doblado para evitar el agrietamiento.

En el pasado, para la mayoría de los tanques de carga, se seleccionaron los aceros inoxidables austeníticos, estos incluían los aceros de grado 304 LN; pero de un uso más común el 316L ó 316LN con 2.5-2.7 Mo como mínimo.

Creusot-Loire (CLI) fue la primera compañía de acero en introducir los aceros inoxidables dúplex para la construcción de tanques para el transporte de productos químicos. El primer caso fue en 1970, cuando Dunkerque Shipyard construyó tres tanques con estas características. Estos fueron (Zambeze, Zeebrugge y Zelanda), con UR 50 grado.

Figura 7:

Muestra micrografías tanto de aleaciones dúplex y austenítica.



Fuente: Jacques Charles, Dúplex Stainless Steels (p.727, 1997)

En la figura 7 se muestran las micrografías de ambas aleaciones de austenita y dúplex, los aceros inoxidables dúplex tienen un balance en su microestructura de 50 α /50 γ esto se obtuvo por el análisis químico y el tratamiento térmico controlado que se le dio.

Esas navas se utilizaron con éxito, en ese momento, la producción y duración de los aceros inoxidables complejos era casi marginal y CLI ya era el líder mundial en la fabricación de aceros inoxidables dúplex. Desde entonces, las industrias del acero han hecho un continuo desarrollo de sus procesos, hasta el momento actual. Esto ha evolucionado hacia un mejor control de los elementos residuales, tales como oxígeno, azufre y otros.

Por otra parte, se ha mejorado el control de los niveles de nitrógeno que con el tiempo ha hecho posible mejorar la resistencia a la corrosión y la estabilidad de estos aceros cuando trabajan a altas temperaturas como es el caso de uniones con soldadura. Por último, la reducción de los niveles de residuos ha resultado en un marcado efecto beneficioso sobre el trabajo en caliente, haciéndose posible la producción de placas.

Todas estas mejoras también han dado lugar a una reducción significativa en los costos de producción, haciendo más y más económicos los costos en materiales. Esto explica por qué ha aumentado el uso de estos metales.

3.3 Problemas de Corrosión

Cuando los Aceros Inoxidables sufren corrosión, generalmente no es uniforme como en el caso de los aceros al carbono, sino localizada. Debido a ello no puede prevenirse con espesores adicionales, sino que debe evitarse la corrosión misma por medio de un conocimiento profundo del medio corrosivo y del acero utilizado. Los aceros inoxidables no son atacados por el ácido nítrico u otros ácidos oxidantes, que facilitan la formación de la película protectora. Por otra parte, en general, estos aceros no resisten la presencia de ácidos reductores como el ácido clorhídrico o fluorhídrico, y son atacados por las sales de ellos (cloruros, fluoruros, bromuros y yoduros). A hora veremos algunos casos en que los aceros inoxidables dúplex, actúan ante esta problemática y que ventajosamente dan a la industria en general.

3.4 Los aceros inoxidables dúplex y su resistencia en el agua de mar.

El Instituto de Desarrollo de Núcleo Centro de Información Técnica Europea, Birmingham, Inglaterra, ha investigado que parte creciente del petróleo en el mundo y la producción de gas se obtiene actualmente a partir de las exploraciones mar adentro. La mejora en la tecnología está permitiendo una explotación económica de los yacimientos en aguas cada vez más profundas y condiciones climáticas severas.

En el desarrollo de este tipo de exploración, Swales y Todd señalan que en los pozos se ha hecho hincapié en la necesidad de equipos que den gran fiabilidad y bajo costo de mantenimiento. Un enfoque clave para satisfacer esta necesidad es por el uso de material de aleación resistente a la corrosión. Los aceros inoxidables y su resistencia en el agua de mar, han tenido un marcado aumento en el uso de dicho material en los últimos 10 años en la industria offshore.

Los ambientes corrosivos que requieren el uso del material de aleación para enfrentar los retos que presentan el agua de mar y el petróleo y el gas que contiene dióxido de carbono o sulfuro de hidrógeno. La mayor parte del material de la aleación utilizada es para las tuberías y los factores económicos que influyen en la elección de tubería de aleación que contiene níquel. Este sistema mencionan Swales y Todd de superestructura y submarinos (Excluyendo el fondo del pozo), las opciones se examinan entre los tipos de aceros inoxidables (austenítico estándar, dúplex y de alto grado de aleación), y unas aleaciones a base de níquel. Entre los sistemas considerados se incluyen para trabajar en agua de mar y lograr la mejor estructura en , tuberías, colectores y otros.

Los aceros inoxidables expuestos al agua de mar, sobre todo en áreas blindadas, son propensos a las picaduras y la corrosión por grieta. Su resistencia a este ataque localizado se mejora si el cromo y nitrógeno contenidos se incrementan. Para un mayor grado austenítico, el contenido de cromo es de aproximadamente 20% y en estos casos se necesitan un nivel, que es de aproximadamente 6% de molibdeno y 0.15% de nitrógeno para dar una aleación con resistencia prácticamente completa a la grieta correspondiente de corrosión en agua de mar. Los estudios detallados sobre el efecto de los elementos de aleación han sido llevados a cabo por varios investigadores, y una clasificación de las distintas aleaciones puede derivarse de su modo

matemático. Sin embargo, las comparaciones útiles pueden ser fácilmente hechas usando la resistencia equivalente por picaduras con sus siglas en inglés (PRE_N)

Que por lo general se calculan de la siguiente manera:

$$PRE_N = Cr + 3.3\% Mo + 16\% N\%$$

Cuanto más alto sea este número, mayor es la resistencia a la grieta por corrosión. El PRE_N indica la marcada influencia de molibdeno y nitrógeno. Se considera necesario un PRE_N de al menos 40 para tener una alación con una resistencia suficiente en agua de mar aireada en aplicaciones críticas, tales como tubos y tuberías de intercambiador de calor. A continuación se menciona el PRE_N que se da para algunos aceros inoxidable contenido en la Tabla 7.

Tabla: 7

Resistencia a la corrosión por picadura en diferentes tipos de aceros inoxidables dúplex

ALEACION	Cr%	Mo%	N%	Ni%	PRE _N
UNS S31603	17	2.5	-	12	25.25
UNS N08904	20	4.5	-	25	34.85
UNS S31254	20	6.0	0.2	18	43.0
UNS N08925	21	6.0	0.15	25	43.2
UNS N08367	21	6.5	0.2	25	45.65

Fuente: Kangas, (p. 28 1994).

En la tabla anterior se observa algunos tipos de aceros inoxidables dúplex, su composición química y su resistencia a la corrosión por picadura, resaltando su resistencia equivalente por picaduras.

3.5 Resistencia a la corrosión de los acero inoxidable dúplex para su aplicación en concretos reforzados.

Los aceros inoxidables como refuerzo en el hormigón ofrecen una mayor resistencia a la corrosión en ambientes donde se encuentra presente el cloruro. La corrosión que se presenta en los aceros que integran el refuerzo del hormigón es un problema de suma importancia, sobre todo, al hablar de la industria de la construcción para medios urbanos con altos niveles de óxido de carbono y azufre. Principales contaminantes que afectan la velocidad de corrosión. El NaCl y el SO₂ son los principales contaminantes corrosivos de la atmósfera. La correlación entre los niveles de concentración de SO₂ ó NaCl y la velocidad de corrosión es alta. También es importante mencionar al sulfuro de hidrógeno, que es el responsable del deslustre de cobre y plata, los compuestos nitrogenados que en solución incrementan la humedad en la superficie de los metales, las partículas inertes (silicio) y las partículas absorbentes (carbón de leña).

Rosso del Politécnico di Torino, Italia (p.619, 1997) señala que para los refuerzos de ensamble, últimamente se están usando aceros dúplex que permiten mayores ventajas económicas y técnicas en esta rama de la industria.

3.6 Resistencia del acero inoxidable dúplex en grietas por corrosión en contenedores de agua con cloruro.

Robert Kain dice que la corrosión que se muestra en forma de grietas es un fenómeno complejo que afecta a ciertos aceros inoxidables y a otros materiales. La aparición de los daños y su extensión es altamente dependiente de una serie de factores ligados entre sí como son, composición de la aleación, el material de acabado superficial, la geometría de la grieta, la química en un entorno a granel y la temperatura son solo algunas de las variables que pueden influir en la resistencia a la corrosión por grieta. Menciona Kain. Este estudio se centra en la resistencia a la corrosión por grieta de aceros inoxidables dúplex, y se determinó en una serie de pruebas como; la exposición al agua de mar y otras aguas que contienen un alto grado de cloruro. Lo anterior tuvo como propósito ver la resistencia de estos aceros en medios con un alto contenido de cloruro, y probar su resistencia a la corrosión para declararlos de utilidad para que integren el cuerpo de los contenedores, Arrojando un buen resultado de resistencia a la corrosión de estos aceros inoxidables.

3.7 Rendimiento de los aceros inoxidables dúplex en ácidos orgánicos

Kangas menciona las ventajas del acero inoxidable de alta aleación tales como los aceros inoxidables dúplex o aleaciones a base de níquel en ambientes altamente corrosivos. Señala las tasas de corrosión de aleaciones en ácido acético y presenta los resultados de las pruebas sobre la influencia de los contaminantes en el ácido. Da aplicaciones prácticas, concluye que los aceros inoxidables dúplex muestran mayor resistencia a la corrosión que los aceros inoxidables austeníticos y son a menudo comparables con las aleaciones a base de níquel.

Los ácidos orgánicos hoy en día son ampliamente utilizados en la industria química, una razón importante es el grupo carboxílico reactivo (-COOH) en ácidos orgánicos, que forma una base para la fabricación de diversos compuestos químicos, que van desde medicamentos hasta los plásticos y fibras.

Como regla general, la corrosividad de los ácidos orgánicos aumenta a medida que el tamaño de la molécula de ácido disminuye, lo que significa que el ácido fórmico es el más agresivo de todos los ácidos orgánicos puros. El ácido acético es un poco menos corrosivo, en su forma pura, pero en presencia de impurezas de la corrosividad puede aumentar sustancialmente. El ácido acético está presente como un disolvente en el proceso de ácido tereftálico, donde pueden producirse condiciones corrosivas severas. El ácido propiónico y ácido butírico son menos agresivos, pero a altas temperaturas o con presencia de impurezas que pueden originar problemas de corrosión en los aceros inoxidables de baja aleación. Los ácidos grasos son menos agresivos, pero los ácidos pueden ser corrosivos durante el procesamiento, si los ácidos de bajo peso molecular aparecen en mezclas de ácidos grasos, o si el ácido graso es anhidro.

Las impurezas son tan presentes en ácidos orgánicos como catalizadores o como contaminantes tales como cloruros férrico, aire y peróxido. Otros ejemplos de impurezas son cuando el ácido fórmico o anhídrido acético está presente en el procesamiento de ácido acético. Si están presentes, iones cúpricos o férricos, las condiciones se vuelven más oxidantes, y la corrosividad

de hecho puede disminuir en ciertas condiciones. Por otra parte, la presencia simultánea de cloruros puede dar un riesgo de agrietamiento por picaduras o corrosión bajo tensión. Esto implica que puede ser difícil de juzgar el desempeño de un material determinado si el proceso contiene impurezas, y como regla general dichos ácidos orgánicos casi nunca se manejan en su estado completamente puro.

El uso de los aceros inoxidable dúplex en aplicaciones de ácido orgánico es todavía relativamente bajo, un amplio conocimiento del rendimiento potencial de estos aceros se ha adquirido a través de pruebas con plantas piloto. Un conjunto de resultados previamente publicado (Kangas et al., 1994) a partir de la producción de ácido tereftálico donde la oxidación de para xileno en presencia de un catalizador ácido acético es la reacción principal, ilustran bien la resistencia a la corrosión de DSS en estos tipos de medios de producción. Se puede observar a partir de la Tabla 8, que la velocidad de corrosión puede reducirse por uno o dos órdenes de magnitud cuando se mide en mm / año por el uso de DSS en lugar de AISI 317L.

Tabla 8

Resultados obtenidos en pruebas que se hicieron en aceros inoxidables y dúplex, para medir su resistencia a la corrosión en medios ácidos.

Materiales	75 % de ácido acético , 25% de H₂O y de Br , Co , Mn velocidad de corrosión mm / año, T = 175 ° C	96 % Ácido acético, 3 % de H₂O huellas de Br , Co, Mn velocidad de corrosión mm / año, T = 175 ° C
AISI 317L	0.44	0.67
AISI317L (soldados)	0.47	0.68
UNS S31803	0.012	0.06
UNS S31803 (soldados)	0.027	0.072
UNS S32750	0.004	0.011
UNS S32750 (soldados)	0.006	0.016

Fuente: Kangas, (p.30, 1994).

En las pruebas de planta también se ha encontrado ventajas genéricas del DSS, sobre aceros inoxidables de más alta aleación como el UNS N08028, que se ejemplifica en la Tabla 9 donde se aprecia resultados que apoyan la tendencia general que se observó en pruebas de laboratorio. Este tipo de pruebas ofrece un complemento importante de los datos de laboratorio que nos puede dar un reflejo fiable de las condiciones del proceso, en lugar de facilitar una clasificación entre los materiales en un entorno determinado.

Tabla 9
Resultados de pruebas electro químicas

Materiales	100 ppm Cl	80%de ácido acético, 14.3% de H₂O, paraxylol, ácido terephthalico Br, F T=140°C velocidad de corrosión, mm/año 500 ppm Cl	1000 ppm Cl
AISI 316L	0.35	0.52	0.09
UNS S31804	0.03	0.02	0.02
UNS N8028	0.07	0.07	0.05
C-276	-	-	0.5

Fuente: Kangas, (p.31, 1994).

3.8 Corrosión en digestores de pulpa kraft

Anteriormente se usaban para estos procesos (digestores de pulpa kraft), según señala Auduard, J.P (p.565, 1997) investigador de Creusot-Loire Industrie, quienes mencionan que los aceros inoxidable 304L y 316L, fueron adecuados para la época y fueron considerados en la serie 300. Estos aceros inoxidable tenían una reacción ante agentes como los cloruros que originan adelgazamiento, debido al resultado del fenómeno de corrosión.

Hoy en día los aceros inoxidable dúplex se han convertido en una mejor opción ante el mencionado problema de adelgazamiento por corrosión, tal a severación se maneja debido al análisis de corrosión que se realizó en 70 lotes de producción para digestores continuos, se recomienda que tales instalaciones pudieran ser revestidas con el mencionado acero dúplex, esto ha impactado de mejor manera en una solución al problema de corrosión en países de Europa, América y Oriente. Reporta Audouard que averiguo en 8 digestores discontinuos en donde la medición de la corrosión (proceso kraft), tenían una media de corrosión de 0.5mm/año lo que correspondió a una vida de servicio mínima de 15 años. Sin necesidad de parar, para realizar el mantenimiento correctivo o preventivo con lo cual el ahorro es considerablemente superior.

3.9 Efectos de la fase sigma en picaduras por corrosión

Pruebas realizadas en el Centro de Investigaciones del Petróleo en Libia para ver la corrosión por picaduras, que se presenta en la fase sigma, arrojan que los aceros del tipo dúplex se han utilizado como un material muy bueno para ser usados en plantas químicas que se encuentran relacionadas con el uso del cloruro y esto es debido a su excelente resistencia a la corrosión comparada con otros aceros inoxidable comerciales del tipo austeníticos y que por otro lado también demuestran una mayor ductilidad y mejor soldabilidad cuando se comparan con los ferríticos.

Sin embargo comenta Elshawesh (p.657, 1997) de la división de investigación de la corrosión, que estos aceros no tienen la resistencia requerida para la corrosión en el agua de mar en un estado de alta temperatura particularmente cuando se está en una condición de soldadura. De aquí se desprende la principal preocupación en la soldadura de los aceros dúplex ya que al transcurrir

dicho proceso se presenta la fase sigma, y los efectos que provoca esta es una baja en su resistencia a la corrosión.

El autor señala que varios trabajos se han llevado a cabo para la investigación de la fase sigma que se presenta en la corrosión por picadura. En esta investigación se reporta el contenido de diferentes efectos que se dan en la fase sigma y en su potencial de picadura en aceros del tipo dúplex inoxidable que se encuentran en una solución acuosa de NaCl a temperatura ambiente.

Los resultados de le ensayo menciona el investigador mostraron que la fase sigma aumenta marcadamente el potencial de picadura de las muestras de acero inoxidable dúplex probados. Además, aumenta el potencial de picadura el cual fue cada vez más importante cuando se incrementó la temperatura. Se encontró que el cambio en la temperatura de ensayo tiene un mayor efecto sobre el potencial de picadura que la que puede causar por la presencia de la fase sigma.

Elshawesh menciona y señala que los resultados más interesantes de este trabajo arrojan que las pruebas en solución purgada con nitrógeno, hacen a los materiales más susceptibles a la corrosión por picadura con respecto a los que se llevaron en soluciones sin purga de nitrógeno. Microscópicamente los aceros examinados arrojaron en la mayoría de los casos, un daño en el material y estos pasaron a través de la fase ferrítica de las muestras de acero inoxidables dúplex ensayados.

3.10 La influencia del cobre en el acero inoxidable dúplex en las picaduras por corrosión en ambientes salinos y ácidos.

Garfias Mesías (p.683, 1997) de la Universidad de Oxford; señala que los aceros inoxidables dúplex resistentes a la corrosión y a las picaduras por ácidos, no podría ser posible si no se considera el papel tan importante que tiene el cobre, en estos aceros inoxidables ahora llamados superdúplex. Estos han sido objeto de investigaciones previas que señalan que este elemento de aleación mejora la resistencia a la corrosión en ambientes ácidos, aunque también el efecto del cobre en sus propiedades, en medios que tienen cloruro ha creado una fuerte controversia.

Señala Garfias que cuando ocurre una reducción en la densidad de corriente galvánica en la aleación superdúplex libres de cobre fueron diferentes cuando se añadieron iones de cobre en un medio ácido, Garfias dice que el cobre se puede acumular en la superficie de corrosión ya sea en una forma como átomos de metal o como un complejo de cloruro que, en esta forma, actúa para proteger eficazmente a la superficie contra la corrosión con una adición de alto y bajo cobre.

Observaciones directas del proceso de picadura indicaron que la iniciación de la corrosión fue preferentemente en la fase de la ferrita, con la aparición de picaduras metaestables (Durante relativamente un prolongado espacio de tiempo débilmente estable), que ocurrieron durante ciertos rangos de temperaturas. De ahí se deduce que hay un rango de temperaturas crítica en las cuales hay que cuidar la picadura. Parece ser que hay una relación entre estas y el punto en el que la corriente pasiva al material, para mantener una cubierta de película de sal estable sobre los sitios activos. El material que tiene un tamaño de grano grande produce hoyos metaestables

más grandes, aunque según el autor el tamaño de grano no parece influir en la aparición de picaduras.

3.11 Grietas ocasionadas por esfuerzos en medios que tienen cloruro.

Estudios realizados en el instituto Swedish de Estocolmo Suecia, dieron como resultado que al estudiar la corrosión bajo tensión (cracking), los aceros dúplex UNS, S32304, S31308 y S32750 (usando curvas de desviación constante), para encontrar que la velocidad en este proceso es más lenta, cuando se encuentran en contacto con, carbono $CaCl_2$ y $MgCl_2$, lo cual probabilísticamente reduce la variabilidad en el ranking y anticipa la corrosión en las condiciones de servicio.

De la misma manera menciona Hertzman que el cracking se vio menos perjudicial en las pruebas con NaCl donde se de notó una mayor resistencia a la corrosión, cuando se evaporó hasta la pulverización para simular la línea de condición de mojado, seco o Cl mixto del agua de mar.

3.12 Servicios y aplicaciones de los aceros inoxidable dúplex en la industria del Petróleo y gas.

En la industria del petróleo y del gas, los aceros inoxidable dúplex han jugado un papel crucial ya que soportan condiciones adversas. Esto se debe comenta Jonsson (p.570, 2005), no solo a su resistencia mecánica y a la corrosión, sino también a que su resistencia a la corrosión por picadura e intersticios es mayor que de las aleaciones austeníticas convencionales, con números equivalentes de resistencia las picaduras (PREN) superiores a 40 en muchos casos.

Todo esto fue expuesto por Jonsson et al, en la Stainless Steels World Conference 13th del 2005 en Holanda; resaltando las aplicaciones más importantes de los aceros dúplex, las cuales son las líneas de flujo, sistemas de tuberías de proceso y equipos como separadoras, depuradoras y bombas. Bajo el mar, los materiales se utilizan en tubos de producción en el fondo de la perforación, conducciones y colectores, componentes de cabezas de pozo, líneas de flujos y conducciones que transportan petróleo y gas corrosivo. Los inoxidable súper dúplex (25% cromo) son útiles por su resistencia a las tensiones de diseño, utilizándose en elementos como barras, piezas forjadas y fundidas, laminas, chapas, tubos y dispositivos de fijación. Los inoxidable súper dúplex también tienen excelente resistencia a la fatiga y compatibilidad galvánica con otros aceros inoxidable de alta aleación.

Jonsson también explica que los cables de acometida se emplean para el control de funciones de cabeza de pozo utilizando líneas hidráulicas, también pueden utilizarse para inyección química. Desde que estos cables de aceros se introdujeron en el mercado, los inoxidable dúplex han sido los más utilizados. En años recientes se tiende a realizar prospecciones a mayores profundidades marinas, siendo necesario con estos cables con mayor longitud. Aumentando la resistencia del material se reduce el peso del cable, lo que permite longitudes mayores. También se han utilizado estos cables en aguas más cálidas y a desarrollar conceptos en los que se introduce un tubo de subida en el cable.

Por ello la demanda de resistencia mecánica y a la corrosión ha aumentado. Se han desarrollado, para su uso en cables, nuevos inoxidables híper dúplex con mejor resistencia mecánica y a la corrosión que la de los inoxidables súper dúplex.

Figura8:
Tubos umbilicales para aplicaciones de gas y petróleo offshore



Fuente: Jonsson,Sandvik(p.579, 2005)

3.12.1 Arquitectura utilizando aceros dúplex.

El inoxidable dúplex sigue teniendo un importante papel en la construcción de puentes, donde las condiciones de corrosión y salinidad se combinan con la necesidad de una alta resistencia para soportar cargas. Dos ejemplos que menciona Bergquist (p.56, 2007), de Asia son el puente Stonecutters, en Hong Kong, y un puente peatonal sobre la Marina Bay de Singapur, en ambos se empleó el inoxidable Dúplex EN 1.4462 (2205). En el 2006 se utilizaron para el puente Stonecutters 2000 toneladas de chapa y tubos dúplex: EN 1.4462 (2205). Un fabricante en china realizó el acabado de los segmentos de la envoltura a partir de chapas personalizadas. Las chapas se pulieron y granallaron para obtener el nivel de reflexión óptimo tanto durante el día como en la noche.

Figura 9:
Puente Stonecutters, Hong Kong



Fuente: Bergquist, Ove Arup & Panthers (p.57, 2007)

El Hélix puente peatonal sobre la Marina Bay de Singapur también utilizó 570 toneladas de inoxidable dúplex. El asombroso diseño de este puente incluye dos elementos tubulares en espiral de inoxidable que hacen alusión a la estructura del ADN, en sus dobles hélices y estructuras de soporte se utilizaron tubos y chapas de inoxidable dúplex EN 1.4462 (2205) respectivamente. Las superficies de inoxidables proporcionan iluminación nocturna al reflejar las luces programadas para resaltar el diseño.

Figura 10:

La Hélix, Singapur, con una estructura resistente de acero dúplex (2205).



Fuente: Bergquist, Financial Dynamics Jones (p.58, 2007)

Otra aplicación del acero inoxidable dúplex en diseños arquitectónicos; que señala Bergquist la encontramos, en el tejado de acero inoxidable más grande del mundo, en el aeropuerto internacional de New Doha de Qatar, se construyó con inoxidable dúplex de baja aleación con molibdeno (S32003). Las características más sorprendentes de la terminal es su enorme tejado ondulado. Su superficie es de aproximadamente 195 000 metros cuadrados y se utilizaron alrededor de 1600 toneladas métricas de inoxidables dúplex.

Para la selección de tipo de inoxidable se tuvo que tener en cuenta varios factores. El más importante fue la cercanía del aeropuerto al mar. El tejado debería resistir no solo el calor y la humedad habitual del Medio Oriente, sino también la corrosión salina, otros factores fueron el costo y una favorable relación resistencia/peso del inoxidable dúplex en comparación con otros tipos de aceros inoxidables.

Figura 11:
Aeropuerto Internacional de New Doha con tejado de acero inoxidable dúplex.



Fuente: Bergquist, Qatar Airways (p.59, 2007)

3.13 Los aceros inoxidables dúplex para uso en tuberías y recipientes de producción

El número de productos transportados por la industria química petrolera aumenta continuamente con el tiempo. Las cargas van desde soluciones muy agresivas tales como el ácido fosfórico, ácido sulfúrico para compuestos más complejos, como la melaza, aceite de pescado, productos químicos, lubricantes, metanol o incluso vino. Algunos de los productos se calientan y pueden contener varias cantidades de elementos altamente corrosivos como cloruro, fluoruro, combinado con ácidos.

El acero utilizado para los tanques debe entonces ser resistente a varios mecanismos de corrosión señala Taule (p.227, 1997), todo esto con el fin de evitar los efectos contaminantes de las cargas, así como daños en los tanques. Además, el acero debe ser también resistente al agua de mar. Hoy en día, la selección de materiales también debe tener en cuenta el transporte de nuevos y más sofisticados productos corrosivos, así como más estrictas regulaciones relativas a la protección del medio ambiente.

El uso de aceros inoxidables dúplex que recomienda Taule, específicamente el 22Cr / 5Ni / 3Mo / N de grado (UNS S31803) para tuberías de la superestructura y de aplicación en las plataformas del Mar del Norte ha crecido notablemente en los últimos cinco años, además de uso para el fondo del pozo, tubería de producción y flujo de líneas submarinas. Su alta resistencia, buena corrosión general y resistencia a las picaduras, buena resistencia al cloruro de SCC y buena capacidad de soldadura hace que sea un material ideal para el CO en el procesamiento de las aplicaciones de superestructura, de equipos y en un mejor costo que el 316L. No es susceptible a la erosión / corrosión en húmedo CO₂ en ambientes a velocidades considerablemente más altas que las probable que se encuentren en los sistemas de tuberías de proceso de superestructura y se puede utilizar juiciosamente para ahorrar considerablemente la parte superior, en comparación con el acero al carbono que incorpora inhibidores de corrosión importantes. El acero inoxidable dúplex (UNS S 31803) soldado con 22Cr / Consumibles 9Ni / 3Mo pueden satisfacer los suficiente requisitos en la prueba de Charpy con un rango de tiempo (35J min promedio, 27J min)

y una temperatura de hasta $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. También se han realizado algunos Ensayos de corrosión sobre UNS S31254 en medio ácidos. El Mo se encuentra presente en el acero inoxidable del tipo UNS N 08904 con un porcentaje del 4.5% este ha sido utilizado en un gran número de plataformas, en forma de sección pesada placa CLAD, sobre todo para buques de separación, además también para las tuberías asociadas.

3.13.1 Comportamiento de un acero inoxidable dúplex de grado 25 Cr a elevada temperatura.

El acero inoxidable súper dúplex (SDSS) es un material candidato comenta Gardner (p.634, 2010), para la tubería de producción en aceite y pozos de gas y ductos submarinos utilizados para el transporte de hidrocarburos líquidos corrosivos. La utilidad de este material para aplicaciones a alta temperatura se examina en este trabajo. Además de sus propiedades de tracción uniaxial se determinan para un acero inoxidable súper dúplex 25Cr durante un rango de temperatura correspondiente a alta presión - aceite a alta temperatura y pozos de gas. Esto muestra que existe un efecto significativo de la temperatura sobre las propiedades de tracción uniaxial.

La Temperatura elevada ha demostrado reducir el módulo de Young y aumentar la cepa índice de endurecimiento; efectos de la temperatura en estos dos parámetros son generalmente desatendidas en el diseño de ductos submarinos y tubulares de pozos de petróleo y esto podría conducir a predicciones erróneas de la presión de colapso.

Los aceros inoxidables dúplex y súper dúplex se utilizan ampliamente para diversos productos y componentes en numerosas industrias, incluidas la refinación y la industria petroquímica, las centrales nucleares y de petróleo y gas.

Acero inoxidable dúplex (DSS) con PREN mayor que 40 se clasifican como acero inoxidable súper dúplex (SDSS). Como regla general, cuanto mayor sea el PREN, mejor será la resistencia a la picadura. El alto valor de PREN SDSS hace que la aleación de este material sea candidato a utilizar en el entorno de medios corrosivos.

La necesidad continua de exploración y producción de petróleo y gas para satisfacer la demanda mundial ha llevado al descubrimiento de nuevos yacimientos de petróleo y gas en alta presión y alta temperatura. El material utilizado para la transportación de petróleo y el gas requiere de tuberías con alta resistencia en entornos difíciles, así como una excelente resistencia a la corrosión a temperatura elevada. SDSS es el material adecuado por elección en estos entornos debido a la resistencia a la corrosión debido a los altos PREN como ya se había dicho.

Toda esta investigación se basa en las normas e investigación de los aceros al carbono. Además, las especificaciones de diseño para el acero inoxidable elementos estructurales, son para estructuras de acero inoxidable a temperatura ambiente. En consecuencia, muchos diseños que

implican el uso de aceros inoxidables en temperatura elevada se basan en datos de acero al carbono con la aplicación de un factor de seguridad.

Este uso de las normas de acero al carbono para el diseño de estructuras de acero inoxidable a elevada temperatura, como es el caso en la industria del petróleo y gas, es demasiado conservador y por lo tanto no apropiado para aceros inoxidables ya que estos presentan una mejor retención de la resistencia y la rigidez en elevadas temperaturas en comparación con los aceros al carbono.

Estudios previos sobre los efectos de la temperatura elevada en el comportamiento mecánico de aceros inoxidables han sido impulsados por la necesidad de entender la protección contra incendios, características y la resistencia a la irradiación, por ejemplo en reactores nucleares. Como un resultado, la mayoría de estos estudios se han centrado en los aceros inoxidables austeníticos y martensíticos que se utilizan ampliamente en aplicaciones estructurales de ingeniería civil.

Pero se ha visto que el rendimiento y tracción de fortalezas para aceros inoxidables austeníticos y martensíticos disminuyen con el aumento de la temperatura en un rango de (hasta 1000 °C) con una reducción significativa por encima de 400 °C.

Sin embargo, se han realizado estudios muy limitados sobre el efecto de la temperatura sobre la uniaxial; propiedades de tracción de los aceros dúplex. Los pocos estudios sobre los aceros dúplex, que también han sido impulsados por la necesidad de la seguridad contra incendios.

La mayoría de los estudios anteriores sobre los efectos de la temperatura elevada en 25 Cr DSS han estado en la precipitación de fases secundarias durante el procesamiento de materiales y soldadura.

Las propiedades de tracción uniaxial se determinó para un acero inoxidable dúplex 25 Cr (Grado 125) SDSS en un intervalo de temperatura relevante para la tracción, acierte a alta temperatura y pozos de gas. Se muestra que existe un efecto significativo de la temperatura sobre las propiedades de tracción uniaxial, con las propiedades que disminuyen al aumentar la temperatura.

La Temperatura elevada ha de mostrado reducir el módulo de Young y el índice de endurecimiento por deformación; otros efectos de la temperatura en estos dos parámetros se suelen descuidar en el diseño de ductos submarinos y tubulares de pozos de petróleo y esto podría conducir a predicciones erróneas de la presión de colapso elástica y plástica

Los resultados presentados anteriormente permitirán un diseño mejor y más seguro de los tubulares de producción de petróleo y gas y ductos submarinos. A pesar del trabajo en frío en la fabricación del tubular SDSS, hubo anisotropía insignificante; esta se determina a partir de las dos mediciones de dureza y también la tracción uniaxial y límites elásticos. Esto implica que el nivel de trabajo en frío en la tubería fue muy bajo.

3.14 Métodos de soldadura aplicable

La segunda generación de aceros inoxidables dúplex (nitrógeno-aleado) tuvo un rápido desarrollo en la década de 1980. Con sólo limitada comprensión de la formación de fases intermetálicas, las primeras opiniones de soldadura de los aceros inoxidables tipos dúplex se centraron en la limitación de la entrada de calor, posiblemente porque este enfoque es lo que se aplica típicamente a los austeníticos especiales. Con tales limitaciones severas en la entrada de calor, muchos de los métodos de soldadura más económicas con altas tasas de deposición, como la soldadura por arco sumergido, se pensaba que eran inapropiados para los aceros inoxidables dúplex. Sin embargo, las propiedades finales de los aceros inoxidables dúplex son de tal interés que tanto esfuerzo fue dirigido a aprender a usar los procesos más económicos.

Ahora prácticamente todos los procesos de soldadura, a excepción de oxiacetileno con su contaminación de carbono asociado de la soldadura, se aplican a los aceros inoxidables dúplex. Arco de gas tungsteno (GTAW), arco metálico con gas (GMAW), blindado soldadura por arco metálico (SMAW), Flux Core Soldadura por Arco (FCAW), soldadura por arco sumergido (SAW) y Plasma Soldadura por Arco (PAW), han tenido una práctica aplicación. Soldadura por resistencia eléctrica y haz de electrones de soldadura, aunque mucho menos común, también han sido calificados y utilizado en fabricaciones particulares. Existen diferencias importantes entre los procedimientos de soldadura. Por ejemplo, la decisión de utilizar una soldadura de flujo blindado y selección de flujo para el efecto de soldadura y tenacidad.

3.14.1 Soldabilidad de los aceros dúplex

En la actualidad este tipo de material está siendo muy utilizado en la industria química petrolera y petroquímica, particularmente en la refinación debido como ya se ha mencionado a su alta resistencia a la corrosión por picadura.

Por lo cual Rouault y Bonnet (p.289, 1997), Señalan al gunos aspectos a considerar para la soldadura de este tipo de material; se han desarrollado consumibles cuyo aporte se ajusta a la composición de acero, pero con un aumento en el contenido de níquel más la adición de nitrógeno para poder estabilizar la estructura metalografica y asegurar la ductilidad. Este tipo de materiales de adición, tanto de electrodos revestidos, alambres o varillas para proceso MIG/TIG, alambres tubulares o alambres y fundentes para arco sumergido, requieren, necesariamente, ajustar cuidadosamente la relación austenita-ferrita.

En la construcción o reparación de los tanques de los buques para transporte de productos químicos, se requiere numerosas uniones entre el acero "dúplex" y el acero al carbono, en estos casos, de uniones de acero al carbono con dúplex, es posible la utilización de varios otros tipos de material de aporte como por ejemplo el 309Mo, ya que como se podrá deducir del diagrama de "Schaeffler", el metal de soldadura resultante tendrá una composición adecuada.

A continuación se mencionan algunas de las recomendaciones observadas durante las reparaciones, fundamentalmente sobre la dilución, el aporte de calor y el sobrecalentamiento:

La dilución, el metal depositado con el metal base es algo de real importancia, ya que si se mezcla con el metal aportado una proporción excesiva de metal base (bajo contenido de Ni), dará como resultante una elevada proporción de ferrita. Esto podría suceder en las soldaduras a tope y en las pasadas de raíz por el proceso TIG, donde hay muy poca adición del metal de aporte. Como regla general, la dilución no deberá exceder del 30 % en ningún procedimiento de soldadura.

El aporte de calor, de acuerdo con experiencias anteriores los aceros dúplex tiene tendencia a desarrollar gran cantidad de ferrita en la zona afectada por el calor. Para disminuir esta consecuencia estos aceros contienen nítrógeno. No obstante, es importante controlar el calor aportado, al mismo tiempo que el metal depositado debe enfriarse a una determinada velocidad, para poder formar suficiente austenita. Por lo tanto el valor aportado debe mantenerse entre los 6.0 y 25.0 Kj/cm.

No es necesario precalentar, salvo en las secciones de mayor espesor y con el fin de reducir el efecto de las tensiones (y en este caso no sobrepasar los 50°C), y la temperatura entre pasadas no debe exceder de los 180°C.

El sobrecalentamiento podría provocar la pérdida de la resistencia a la corrosión y de la tenacidad; si los cordones de soldadura o las zonas afectadas térmicamente estuviesen expuestos, en forma repetida, a temperaturas comprendidas en el intervalo de las precipitaciones pudiendo formarse fases intermetálicas.

Tal como se mencionó anteriormente, los problemas de corrosión pueden presentarse en los cordones de raíz, y un buen procedimiento para evitarlos fue el de utilizar pasadas de raíz "frías", es decir con un aporte de calor del orden de 14.0 a 20.0 Kj/cm., seguidas de una o dos pasadas de relleno con un aporte de calor de 15.0 Kj/cm. Como máximo.

3.14.2 Soldadura de un acero inoxidable dúplex 2205 por el proceso de soldadura GTAW o TIG

La soldadura por arco eléctrico con gas de protección y electrodo no consumible de tungsteno, mejor conocido como GTAW o TIG, es un proceso en el cual se funde el metal a soldar, a través del calentamiento producto de un arco eléctrico, entre un electrodo de tungsteno y la pieza. En este proceso se utiliza un gas inerte para protección del charco de soldadura y del electrodo. Siendo opcional la utilización de material de aporte. El proceso de soldadura GTAW puede ser usado para soldar aceros al carbono e inoxidables, aluminio, magnesio, cobre, etc.

El acero inoxidable 2205 dúplex posee una microestructura constituido básicamente por las fases mayorista de ferrita y austenita en proporciones casi iguales. Esta microestructura proporciona a

los aceros inoxidable dúplex propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión superior en comparación con otro tipo de aceros inoxidable.

Cuando se manufacturan o reparan piezas comúnmente se emplean dispositivos soldados, por esta razón es importante el estudio del efecto de la soldadura sobre el acero inoxidable dúplex 2205, para lo cual en las señaladas por el investigador Ramírez se utilizó el siguiente material.

Se emplearon láminas de espesor de 6mm de un acero inoxidable dúplex 2205 (UNS 31803), a las cuales les realizaron un bisel en “V” en ángulo de 60° y talón de 2mm. Se utilizó material de aporte del tipo 22.8.3 L de 1.6 mm de diámetro.

Para conseguir cordones de soldadura con una buena penetración el Ingeniero Arturo Ramírez señala, que se evaluó como primer parámetro la intensidad de corriente de soldadura, se realizaron seis cordones de corriente de soldadura comprendidos en un rango de 60 a 175 A. Posteriormente señala el investigador estas laminas se cortaron transversalmente para verificar la penetración alcanzada en cada uno de estos cordones.

Ya teniendo un rango de corriente de soldadura con el cual se obtuvieron cordones con buena penetración, se procedió a evaluar otros parámetros indicadores, tales como velocidad de avance, longitud de arco, cantidad de material de aporte y separación de raíz. Una vez conseguido los parámetros de soldadura adecuados, en relación al calor aportado, aspecto superficial, refuerzo de raíz y penetración, se procedió a soldar el resto de las láminas con dichos parámetros. El calor aportado se calculó según la siguiente ecuación

$$\text{Aporte calorico} = \frac{V \cdot I \cdot 60}{V_a \cdot 1000} \left(\frac{kJ}{mm} \right)$$

Siendo I (A) Y V (V) la corriente y voltaje del proceso respectivamente, V_a la velocidad de avance en la soldadura (cm/min). Este aporte calórico es muy importante debido a su conocido efecto sobre la microestructura, tanto de la zona de fusión como de la zona afectada por el calor. Un aporte calórico excesivo modifica el balance entre las fases mayoritarias (ferrita-austenita) y también favorece la formación de fases minoritarias perjudiciales (precipitados).

Efecto de la velocidad de enfriamiento post-soldadura. Para evaluar el efecto de la velocidad de enfriamiento se soldaron las 6 láminas con las condiciones señaladas anteriormente, realizando enfriamientos post-soldadura en dos medios distintos (aire-agua).

Como el cordón de soldadura está constituido por dos pases, al finalizar el primer pase se enfrió la lámina, ya sea en aire o en agua y luego secaron y cepillaron la lámina, para posteriormente realizar el pase de relleno.

Comenta Arturo Ramírez que las juntas soldadas se evaluaron realizando ensayos de dureza y tenacidad de impacto Charpy, con la finalidad de evidenciar el efecto de la velocidad de enfriamiento en la soldadura sobre las propiedades de la junta en comparación con el metal base.

3.14.3 Parámetros de soldadura considerados en el caso práctico

Para los parámetros de soldadura más adecuados comenta el Ingeniero Arturo Ramírez junto con sus colegas, primero se determinó un rango de corriente de soldadura, dentro del cual se obtuvieron cordones con buena penetración. Para esta actividad se tomaron 6 láminas de prueba, en la lámina número 5 y número 6 fue donde se obtuvieron un mejor acabado superficial, mejor penetración y buena relación ancho/profundidad de la cordón. Fijaron entonces el rango de corriente de soldadura a ser utilizado entre 75 y 150 A.

Posteriormente se evaluaron las condiciones de soldadura encontrándose los parámetros con los cuales se obtuvieron los mejores cordones, tanto para el pase de raíz como para el pase de relleno como se muestra en la siguiente tabla 10.

Tabla 10:
Condiciones de soldadura y calor aportado para cada pase de cordón.

Variable	Pase de raíz	Pase de relleno
Corriente (A)	125	125
Voltaje (V)	20	20
Velocidad de avance (cm/min)	4.14±0.14	3.53± 0.10
Calor aportado (kJ/mm)	3.62	4.25
Longitud de arco (mm)	3	3

Fuente: A. Ramírez Rev., *Latinoamerican.Metal.Mater*, (2006) p.46-50

El flujo de gas protector y de respaldo se mantuvo constante, siendo el caudal 10 lt/min para el pase de raíz y de 15 lt/min para el pase de relleno, la separación de raíz se fijó en 2.3 mm.

3.14.4 Ensayos mecánicos que muestra el caso práctico

Para el ensayo de dureza Vickers (HV) los investigadores comentan, se empleó una carga de 30 kgf y un tiempo de aplicación 15s. Se llevaron a cabo tres barridos de dureza trasversales al cordón de soldadura. Tratando de realizar mediciones al pase de relleno, al de raíz y al de la zona intermedia de los dos cordones. En la tabla número 11 se reportan los valores de dureza Vickers, tanto en la probeta enfriada en agua como la enfriada en aire. Al comparar las medidas de dureza obtenidos en cada uno de los barridos lineales realizados, se observó uniformidad en los valores, es decir la dureza en el cordón de relleno, el cordón de raíz y la interface es muy similar, teniendo diferencias poco significativas.

Tabla 11:
Valores promedio de dureza Vickers (HV) con 30 kgf

Líneas	Enfriamiento en agua (HV)	Enfriamiento en aire (HV)
A	225	228
B	230	230
C	230	228
Promedio	228	229

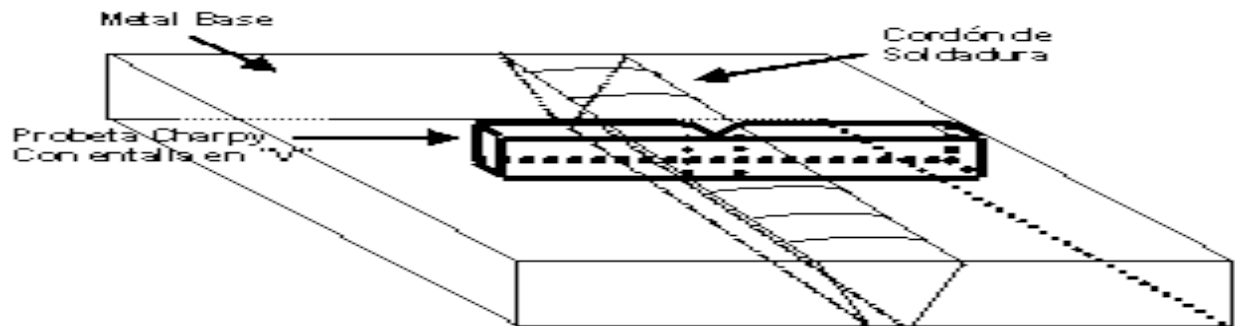
Fuente: A. Ramírez Rev., Latinoamerican.Metal.Mater, (2006) p.46-50

Adicionalmente al comparar el valor promedio los investigadores de la universidad central de Venezuela, de la probeta en friada con aire y la en friada con agua, tampoco se observa una diferencia considerable que pueda ser de interés para su investigación.

Los ensayos de tenacidad de impacto Charpy los realizaron con una carga de 300 J y a una temperatura de -40°C . Fabricaron las probetas con entallas y bisel en V de 2 mm de profundidad sobre el cordón de soldadura para los dos modos de enfriamientos. En la siguiente figura 12 presentan la disposición de la probeta en el cupón soldado. Notando que la entalla quedo justo sobre el cordón de soldadura.

Figura12:

Disposición de la probeta Charpy en el cupón de soldadura.



Fuente: Rev., Latinoamerican.Metal.Mater, (2006) p.46-50

En la tabla número 12 nos presentan los valores obtenidos en el ensayo de Charpy, para el metal base y los dos modos de enfriamiento aplicados. Al comparar los valores obtenidos se observó que la muestra enfriada en aire posee mayor tenacidad que la muestra enfriada en agua e incluso que el metal base. Para poder dar explicación a lo anterior los ingenieros dicen que se trató de relacionar el contenido de austenita, la dureza y la tenacidad, y como resultado no encontraron relación entre el balance de fases mayoritarias, las medidas de dureza prácticamente uniformes y los valores de tenacidad de impacto separados.

Tabla: 12
Valores promedios de energía absorbida con una carga de 300 J.

	Energía absorbida J
Metal base	124.1±3.3
Enfriado en agua	113.9±13.1
Enfriado en aire agitado	136.0±7.2

Fuente: A. Ramírez Rev., Latinoamerican.Metal.Mater, (2006) p.46-50

Por lo tanto la explicación a esta diferencia de tenacidad, tiene su origen en la microestructura de la austenita globular encontrada en el pase de raíz del cordón de soldadura, esta microestructura globular aumenta la capacidad del material de absorber en impactos.

En lo que respecta a la diferencia registrada en los valores de energía absorbida entre las dos condiciones, a) enfriamiento en agua y b) enfriamiento en aire agitado. Esta es explicada por la misma metodología de la aplicación de la soldadura, en el caso del enfriamiento por el aire agitado, la velocidad de enfriamiento es mucho menor que la de enfriamiento por agua, lo que permite que se produzca un alivio de tensiones al macenados en el material favoreciendo el aumento de la tenacidad.

3.14.5 Ensayos no destructivos del caso práctico

Realizaron en el cordón de soldadura los siguientes ensayos no destructivos, inspección visual, radiografía industrial y líquidos penetrantes.

En el caso de la inspección visual se utilizó como técnicas antes y durante y después del proceso de soldadura, en ella se determinó que el material antes de ser soldado no presentaba costuras, es camas entre otros. La utilización de radiografía industriales en la junta soldada se justificó en la observación de otros defectos como grietas, porosidades, inclusiones de escoria, alabeo, socavamiento, mordeduras, exceso de soldadura, falta de fusión, falta de penetración y traslapes, con el fin de que el cordón de soldadura presentara un buen acabado superficial y una buena penetración que fueron los objetivos de esta investigación.

Finalmente la técnica de líquidos penetrantes se empleó como control adicional para la localización de grietas superficiales. Las pruebas realizadas demostraron que este proceso de soldadura produce cordones de soldadura con una alta calidad y libres de defectos, lo cual lo hace confiable, también se demostró que los enfriamientos violentos realizados, tanto para el pase de raíz como el pase de relleno, no generaron tensiones residuales de altas magnitudes que pudieran dar como resultado algún defecto, bien fueran internos o externos. La experiencia adquirida durante este proceso de soldadura indicó que el uso de gas de respaldo es fundamental para la

obtención de una buena penetración completa, como lo muestra la siguiente figura 13 en la cual se realizó una inspección visual del cordón de soldadura.

Figura 13

Inspección visual del cordón de soldadura



Fuente: A. Ramírez Rev., Latinoamerican.Metal.Mater, (2006) p.46-50

3.15 Tratamiento térmico después de la soldadura

A diferencia de los aceros inoxidables austeníticos grado L, los aceros inoxidables dúplex son susceptibles incluso a exposiciones relativamente cortas a temperaturas entre 300 a 1000 ° C. Puede provocar la precipitación de la fase alfa prima 475 ° C, causando una pérdida de tenacidad y resistencia a la corrosión. El alivio de tensión, lleva a una rápida precipitación de fases intermetálicas con moderada a severa pérdida de tenacidad y resistencia a la corrosión. Cualquier tratamiento térmico de un acero inoxidable dúplex por cualquier razón, debe ser un recocido de solución completa, las temperaturas mínimas especificadas para el producto en las especificaciones de la ASTM, seguido de enfriamiento con agua. Para 2205 es a temperatura mínima es de 1040 ° C en la mayoría de los casos.

Algunos equipos fabricados en acero inoxidable dúplex requieren un recocido completo. Por ejemplo, la formación de grandes cabezas o la fabricación de algunos conjuntos de válvulas y tuberías.

El procedimiento de soldadura puede requerir un recocido de solución completa. El recocido puede restaurar el equilibrio de fases y eliminar los problemas asociados con exceso de ferrita y fases intermetálicas. Si se usa un relleno dúplex común, típicamente sobre aleado con níquel, el equilibrio de fase en la soldadura totalmente recocida puede desplazarse hacia la austenita.

En el enfriamiento en agua es esencial después del recocido final, y para un recocido intermedio se recomienda tener el material a una temperatura más baja que la ambiente.

3.16 Estudios de caso en análisis de fallas de ingeniería

El grupo de investigadores de la escuela de ingenieros mecánicos en conjunto con la Universidad del este de China, dirigidos por el científico Jingqiang Yang et al, señalan en su análisis de falla en la unión que se da entre la cabeza y la boquilla de un reactor de acero inoxidable dúplex 2205 que los resultados mostraron un agrietamiento que ocurre a lo largo de la columna granular, y esto ocasiona que dentro de la hendidura del material que se está soldando se fracture. Todo esto se da por un mal proceso de soldadura y esto tendrá como resultado la presencia de grietas. Como se verá en el siguiente caso práctico

El acero inoxidable dúplex (DSS) con las dos fases de ferrita y austenita tiene una mejor resistencia a la corrosión. Por lo que, el DSS ha ganado cada vez más interés en los últimos años por una serie de aplicaciones en varios sectores industriales, por mencionar algunas industrias en que se están aplicando estos aceros encontramos, la industria química, petroquímica, generación de energía, y refinería del petróleo.

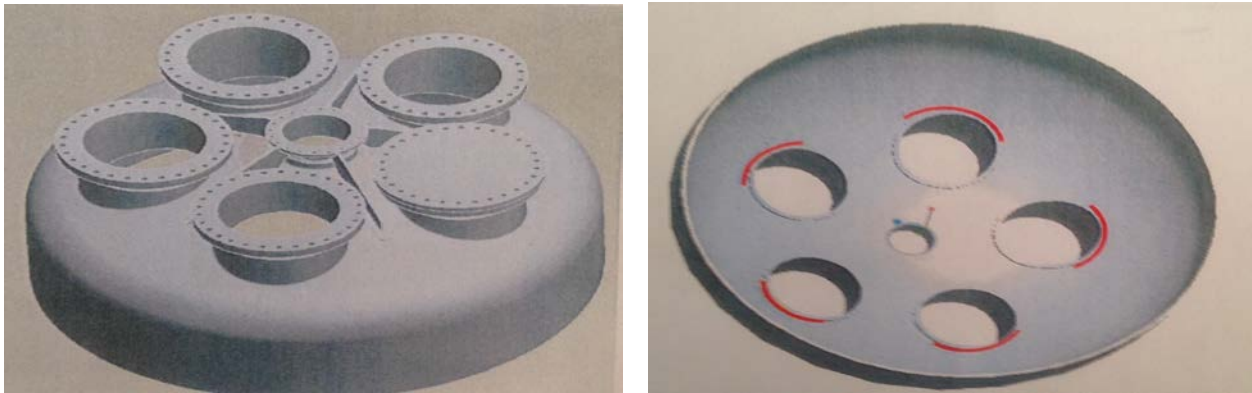
Las buenas propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión de DSS depende de la balanza de ferrita austenita adecuada, que es de aproximadamente 1: 1, y el contenido de alto Cr, Mo y N. Sin embargo, el soldar DSS tiene el inconveniente de que las propiedades mecánicas se deterioran significativamente, causas que dan como resultado el agrietamiento crítico para la aplicación de los recipientes de acero inoxidable dúplex.

En este trabajo se estudió el mecanismo de falla de un cilindro de reactor después de 1 año de operación. Con las siguientes especificaciones, la presión de la temperatura de trabajo y el funcionamiento del reactor son alrededor de 100°C y 0.2 MPa, respectivamente. El medio en que se procesa gas utilizado. La composición química del material del reactor.

La figura 14 muestra el dibujo esquemático de la cabeza y boquillas del reactor. El diámetro del reactor es de 4000 mm con un espesor de 34 mm en la cabeza. Cinco boquillas exteriores se colocan en la cabeza para entrar y mantener las bobinas. La boquilla central mantiene el agitador. Las conexiones entre las boquillas y la cabeza se sueldan por SMAW (metal blindado soldadura de arco) las soldaduras se realizan en cuatro o cinco fases. Las grietas se pueden encontrar en todas las cinco boquillas exteriores y todas se encuentran en la posición grieta esquemática.

La grieta originada a partir de la ZAC y la profundidad de las grietas es exactamente igual al espesor de la soldadura interna de 17 mm de la profundidad Grove K-. La figura 14 muestra una imagen de las grietas. Las grietas aparecen en el lado de la boquilla. No hay adelgazamiento de la pared o deformación plástica que se observe cerca de las grietas, lo que revela que el fracaso es la fractura por fragilidad en la naturaleza.

Figura 14:
Estructura esquemática y grieta entre la boquilla y el calor para el reactor con
(a) exterior **(b) en el interior.**

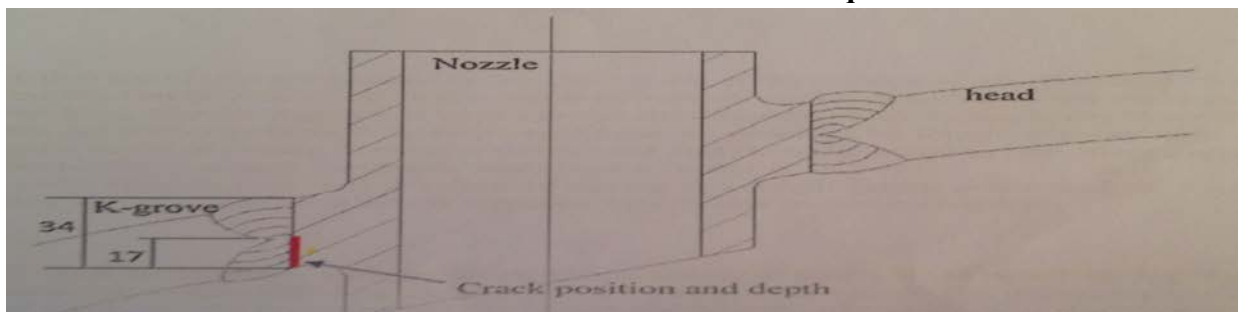


Fuente: J.Yang et al. Case Studies in Engineering Failure Analysis 2 (2014) 69-75.

En el análisis de la discusión, Jingqiang Yang señala que poder resumir la localización de las grietas en las boquillas y tener un grosor equivalente dentro de la soldadura es esencial para tener uniones fuertes. Por qué las grietas que se presentan, si no ha y un buen trabajo de soldadura se describen como el resultado del agrietamiento intercolumnar de la soldadura del metal y las pequeñas aéreas soldadas.

Si la soldadura presenta una gran distribución desigual de la ferrita-austenita de 80-90%, la ferrita se fundirá primero causando fallas en las uniones soldadas y en el material. Se encontró que todas estas fallas y la presencia de grietas son causadas por un mal proceso de soldadura. Y esto revelo una escasa habilidad del soldador para soldar este material.

Figura 15
Estructura de soldadura entre la boquilla



Fuente: J.Yang et al. Case Studies in Engineering Failure Analysis 2 (2014) 69-75.

Es necesario asegurar la continuidad de las propiedades de estructura dúplex a través de la soldadura mediante el control y equilibrio de fase. Para la aplicación práctica de este tipo de uniones soldadas, una proporción adecuada de ferrita en las juntas soldadas estaría en el rango de 30- 70%. Este contenido de ferrita depende de la composición química de las juntas soldadas y las tasas de enfriamiento de la soldadura, que se determinan por la energía de entrada aplicada durante la soldadura. Las soldaduras van a ser reparadas por GTAW método (Soldadura TIG),

que es mejor método si lo comparamos con el SMAW (metal blindado de soldadura de arco) método utilizado antes, ya que permite soldaduras limpias, mejor penetración de la soldadura y una mejor aplicación controlada de calor. ER 2209 con 2.0 mm de diámetro se utilizará como material de relleno.

Figura 16
fractura de soldadura



Fuente: J.Yang et al. Case Studies in Engineering Failure Analysis 2 (2014) 69-75.

Lo mencionado en este caso sumado a la descripción hecha por el ingeniero Hugo Cárdenas Gutiérrez en su examen de grado profesional, nos hacen resaltar la importancia de una técnica eficaz en el proceso de soldadura de un acero dúplex. El cual tiende a perder sus propiedades al verse expuesto a las altas temperatura de este proceso.

En ambos casos se señala la necesidad de mantener el equilibrio en las fases austenítica-ferrítica mediante el constante enfriamiento del material durante el proceso de soldadura.

Conclusiones y recomendaciones

Todo trabajo en su parte final debe llegar a un fin donde se aprecie la utilidad que este tiene, así como los aspectos que son importantes, pero que no se tocaron por alguna razón. A continuación dividimos las conclusiones y recomendaciones como producto de este trabajo de tesis.

Conclusiones

- Se buscó con este análisis de la información llegar a incrementar la comprensión que hasta el momento se tenía de los aceros inoxidable dúplex.
- Con este trabajo es posible ubicar con mayor precisión el sentir de una parte de los investigadores referente al manejo, uso y problemática que presentan los aceros antes mencionados.
- Los aceros inoxidable dúplex resultan superiores a los otros tipos de aceros inoxidable principalmente cuando interactúan con algunas sustancias corrosivas tanto ácidas como alcalinas.

Recomendaciones

Con la experiencia desarrollada en el transcurso de este trabajo de tesis, sugerimos una continuidad que nos permita ver los avances que año con año se exponen en la (World Conference Stainless Steels).

Se cree que ya hay material suficiente en las memorias de dichos eventos, es por eso que se propone en este trabajo de tesis, indagar en el perfeccionamiento que hoy en día se hace a estos materiales y que se haga alusión a las acciones de investigación que perfeccionen a estos materiales, lo mismo que a los límites en los que ha llegado y las posibilidades que nos brindaran en un futuro.

Además dejamos esta investigación como una base para futuros trabajos en los cuales se tenga que ver los tipos de aceros inoxidable, sus propiedades y por supuesto sus aplicaciones y ventajas que manejan estos materiales.

Así mismo mencionamos otras importantes aplicaciones de estos materiales, en específico de los aceros dúplex ya que su uso va en aumento en todos los ámbitos de la industria en general como por ejemplo; Los biocombustibles e especialmente el etanol son un sector donde el uso de los aceros inoxidable dúplex está creciendo. A tal grado que en diferentes plantas de biocombustible de Países como Singapur, Holanda y Suecia, los tipos inoxidable dúplex de baja aleación se han utilizado para reemplazar los inoxidable austeníticos de la serie 300 en muchas aplicaciones de servicio de etanol.

Otro ejemplo de la aplicación de los aceros inoxidables dúplex se encuentra en la industria de alimentos y bebidas, se ha utilizado en dos grandes proyectos en España, en un almacén de alimentos y otro de vino. En el puerto de Barcelona la empresa Emypro S.A. construyó depósitos para almacenar alimentos así como una amplia gama de bodegas para vino, ya que por ser un material con buena resistencia a la corrosión y una excelente maquinabilidad ofrece grandes ventajas, las cuales se reflejan en ahorros de mantenimientos preventivos y correctivos; que se tenían que hacer con los inoxidables de la serie 300.

Y como último punto de estas aplicaciones y recomendaciones, dejamos este trabajo para todos aquellos que les interese los sectores de la construcción, de diseño y mejora en los sectores de las industrias; Metalúrgicas, Petroquímicas, Alimenticia y en todas aquellas que manejen sustancias altamente corrosivas. Lo cual les dará una buena idea de qué tipo de materiales son resistentes a los fenómenos físicos ya mencionados.

Anexos

TABLA 1 : Distintos tipos de aceros inoxidable ⁵									
AISI	UNS	%C	%Mn	%Si	%Cr	%Ni	%P	%S	Otros
ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS									
405	S40500	0.08	1	1	13	--	0.04	0.03	0.2 Al
430	S43000	0.12	1	1	17	--	0.04	0.03	--
434	S43000	0.12	1,25	1	17	--	0.04	0.03	1.0 Mn
446	S44600	0.2	1,5	1	25	--	0.04	0.03	0.25 N
18SR		0.004	0,3	1	18	--	--	--	2.0 Al, 0.4 Ti
A1 29-4 2	S44800	0.01	0.3	0.2	29	2.2	0.025	0.02	3.8 Mo
ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS									
303	S30300	0.15	2	1	18	9	0.2	>0.15	0.06 Mo
304	S30400	0.08	2	1	19	9,2	0.045	0.03	--
316	S31600	0.08	2	1	17	12	0.045	0.03	2.0Mo
317	S31700	0.08	2	1	19	13	0.045	0.03	3.5Mo
321	S32100	0.08	2	1	19	14	0.045	0.03	Ti=5xC min
347	S34700	0.08	2	1	18	11	0.045	0.03	Cu+Ta=10xC min
20 Mo6		0.03	1	0.8	24	35	0.03	0.03	5.7 Mo,3C u
254 S mo	S31254	0.03	1	0.8	20	18	0.03	0.01	6.2Mo 9.7Cu 0.2N
ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS									
403	S40300	0.15	1	0.5	12.2		0.04	0.03	
410	S41000	0.15	1	1	12.2		0.04	0.03	
416	S41600	0.15	1.25	1	13	--	0.04	0.03	0.6Mo
431	S43100	0.2	1	1	16	1.9	0.04	0.03	-
440A	S44002	0.67	1	1	17	--	0.04	0.03	0.75 Mo
416 PLUS	S41610	0.15	1	1	13	--	0.06	>0.15	0.6Mo

⁵ Fontana, Mars. Corrosión Engineering. Mc Graw Hill Book Company. EEUU, 1985

Tablas 2: Distintos tipos de aceros inoxidables dúplex

UNS	NOMBRE COMERCIAL	%Cr	%Ni	%Mo	%N	Otros
S32304	SAF 2304 SR 35N	23	4	0.2	0.1	
S32404	UR 50 VEW A903	21 18.5	7 5	2.5 2.7	0.07 0.07	1.5 Cu 1.5 Si
S31803	UR 45N SAF 2205	22	5.3	3	0.16	
S31260	DP-3	25	6.5	3	0.16	0.5 Cu 0.3 W
S32550	UR 52 N	25	6.5	3	0.18	1.6 Cu
S32200	VEW A905	26	3.7	2.3	0.34	6 Mn
S32760	ZERON 100	25	7	3.6	0.25	0.7 Cu 0.7 w
S32550	UR 52N+	25	6	3.8	0.26	1.5 Cu

AISI	NOMBRE COMERCIAL	%C	%Cr	%Ni	Otros
MARTENSÍTICOS					
635	Stainless W	0.07	16.5	6.8	0.5 N/0.5 Si/0.4 Al/0.8Ti
630	17 - 4 PH	0.04	16,0	4.0	0,25 Mn/0.6 Si/3.2 Cu/ 0.25 (Cd+Ta)
----	15 - 5 PH	0.07	15.0	4.0	4.0 Cu/0.35 (Cd+Ta)
SEMIAUSTENÍTICOS					
631	17 - 7 PH	0.07	17,0	7,0	0.6 Mn/1.15 Al
632	PH 15 - 7 Mo	0.07	15,0	7,0	2.20 Mo/1.15Al
633	AM - 350	0.10	16.5	4.3	2.75 Mo/0.10N
600	A286	0.08	15	26	1.3 Mo/0.3V/2.0Ti/ 0.35 Al/0.003B/0.4Si
----	17 - 10 P	0.12	17,0	10.0	0.75 Mn/0.6 Si/0.25 P
----	17 - 14 Cu Mo	0.12	16.0	14.0	3.0Cu/2.5Mo/0.5 Cd 0.25Ti/0.50Si/0.7 5Mn

Referencias Bibliográficas

Libros

- [1].-Apraiz, B. J, (1982). “*Acerosa especiales y otras aleaciones*”, España: Ed. Dossat, pp. 431-432.
- [2].-Audouard, J.P, (1997). *Creusot-Loire Industrie, France*, pp. 565, 571.
- [3].-Avner, H. (1966). *Introducción a la Metalurgia Física*, México: Ed, MC Graw-Hill pp.578-597.
- [4].-Bergquist, C. (2007), *Machining in the New Duplex Grade*, Italia, pp. 56-61
- [5].-Elshawesh, F. (1997). *Corrosion Research Division*, Petroleum Research Center, Libia, pp. 657-658.
- [6].-Evans, G.M, (1997). *Metallurgy of basic weld metal.*, Inglaterra: Ed., Abington Publishing pp.48-49, 148-224.
- [7].-Frodigh, J. and Nicholls, J, (1998). *Mechanical Properties of Sandvick Duplex Stainless Steels* AB Sandvick Steel, Suecia pp.81, 811.
- [8].-Galiana, M.T, (1987). *Gran Diccionario de las Ciencias*, España: Ed Larousse Tomo 5 pp.806-807.
- [9].-Gardner, L. A, et al, (2010), *Materiales a elevadas temperaturas y propiedades de la aleación de acero inoxidable dúplex*, Inglaterra, pp. 634-647
- [10].-Garfias, M. L, and Sykes J. (1997). *University of Oxford*, UK, p. 683.
- [11].-Hernández, R.G. (2012). *Directrices Prácticas para la Fabricación de los aceros dúplex* cicardrei Munich, Inglaterra: primera edición p.24
- [12].-Herrero, B.S, Ulargui, J. (2014). *Introducción al Conocimiento de Materiales*, Technology and Enginnering, México, Ed. UNED, pp.285-286.
- [13].-Inchaurza.A. Z, (1981). *Aceros inoxidables y resistentes al calor*, México: Ed. Limusa, pp. 31-32, 257-288, 404-405

- [14].-Kalpakjian, S, and Schmid, S. R, (2002). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, México: (4 edición).Pearson Educación. p. 148.
- [15].-Kain, M. R, (1997). *La Que Corrosión Servicio*, Wrightsville Beach, NC, USA, p.627.
- [16].-Khan, E. (1990).*Effects of Water Vapour on oxide Growth on 304 Stainless Steel*. Cambridge, Inglaterra, p.113.
- [17].-Laufgang, G.S, (2003). *Aceros Inoxidables*, Termo soldex S.A. México, pp. 2, 27.
- [18].-Liljas, M. et al, (2005). Stress Relief Treatment, Stainless Steels World, Maastricht, Holanda. pp. 569-572
- [19].-Lovland, P. Presidente, et al, (1997). Dúplex Stainless Steels 5th World Conference Book 1 and 2, by Stainless Steel World. Maastricht, Holanda.
- [20].-Medina, L. Romero, (2009). *Proceso de Fabricación del Acero*. España: Ed. Upcommons, pp.3-6.
- [21].-Méndez, C. C, A. (2011). *Tesis Embutido de Acero Inoxidable*, FES Aragón UNAM, México. p.20.
- [22].-Pere, M. S, (1989). *Metales Resistentes a la Corrosión Boixareu Editores*, España: Ed, Marcombo, pp. 64-72.
- [23].-Ramírez, A. et al. (2006). *Soldadura de un Acero Inoxidable Dúplex 2205 por el proceso de Soldadura GTAW.*, UCV, Venezuela: Ed, Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales pp. 43-50.
- [24].-Robertson, J. and Manning, M. I, (1984). “*Healing Layer Formation in Fe-Cr-Si Ferritic Steels*”, Materials Science and technology, Vol. 5, pp. 741-753.
- [25].-Rosso, M. (1997). Politécnico di Torino, Italy, pp. 619-620.
- [26].-Rowley, P.N.et al. (1990). “*Boron Inhibited Steam Oxidation of Fe-Cr Alloys Studies Using eels*”, Microscopy of Oxidation, Inglaterra, p.64.
- [27].-Suzuki, S. K, (1991). “*AES/GDS Characterization of Thin Oxide Films on Fe-Cr Sheet Steels*”, Surface and Interface Analysis, Vol.17, pp. 551-555.

[28].-Tubal, C. (1995) *Endurecimiento, revenido y tratamiento térmico*. UAM, México Ed.Gilli, pp. 7, 12.

[29].-Verhoeven. D, J, (1987). *Fundamentos de Metalurgia Física*. Departamento de Metalurgia Iowa State University, USA. Primera Edición: Ed. Limusa, pp.550, 553-580.

[30].-Vernon.P, K.D, et al, (1988). “*Distribution of Yttrium in Aluminium Containing Stainless Steels and its Effects on Structure of Oxide Layers*”, Materials Science and Technology, Inglaterra, Vol.4, p.461.

[31].-Wagner, C. (1965). *Corrosión*. Sci., pp. 5,751.

[32].-West, J.M. (1986). “*Fundamentos de Corrosión y Oxidación*”, Ed. Limusa, 1ª. Edición, p.225-227.

[33].-Whittle, D.P, et al, (1967). *Acta Metall.* pp. 15, 1747

Manuales

[34].-American Society Testing and Materials. (1998). Manual Book of ASTM Standards. U.S.A. Vol.10.

[35].-Barson y Rolfe. (1986). *Fracture and Fatigue Control in Structures*. EUA. Prentice Hall.
Compendio de normas para productos de acero, (2000). GERDAU AZA, Chile: Tercera edición, pp. 11-14.

[36].-Dirección de Industria Metalmeccánica, (2012). El sector siderúrgico, Secretaria de Economía México, pp. 2-25.

[37].-Ibarra, M.E, (2010). Manual aceros inoxidable, INDURA, pp. 21,22,

[38].-Proceso de Fabricación del Acero Inoxidable – Cedinox (Centro para la investigación y el desarrollo del Acero Inoxidable en España).

Referencias digitales

[39].-bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen

[40].-www.cedinox.es

[41].-www.cn-steel.com

[42].-www.industrialmecanica.com.ar/carbono.pdf

[43].-www.monografias.com › *Ingeniería*

[44].-Fuente: ivancuadriello-eaf.blogspot.com

[45].-Blog análisis de fallas (2007).