

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



**ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE UN ACERO DUPLEX
S32205 PARA LA FABRICACION DE UN TANQUE DE
ALMACENAMIENTO**

INFORME DE SUFICIENCIA

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECÁNICO**

LADISLAO RONALD LEYVA GIRALDO

PROMOCION 2008-II

LIMA-PERU

2 0 1 2

DEDICATORIA:

A mis Padres por darme la vida, quererme mucho, creer en mí, por sus enseñanzas, valores y por su apoyo que me permitieron cumplir este objetivo.

A mi Esposa Evelyn y mis hijas Nayeli y Sharon por su cariño, comprensión y su apoyo.

A mis tíos Mery, Marco y Richard por sus consejos, confianza y su apoyo incondicional.

A mis hermanos Beto, Robert y Cristiano para que vean en mi un ejemplo a seguir.

INDICE

PROLOGO	1
CAPITULO I.- INTRODUCCION	3
1.1 ANTECEDENTES	3
1.2 JUSTIFICACION DEL TEMA	5
1.3 OBJETIVO GENERAL	6
1.4 OBJETIVOS ESPECIFICOS	6
CAPITULO II.- ACEROS INOXIDABLES DUPLEX	7
2.1. CONCEPTOS BASICOS	7
2.1.1. Sensibilización	7
2.1.2. Formación de fisuras y rol de la Ferrita	8
2.1.3. Fase Sigma	8
2.1.4. Fase Chi	8
2.1.5. Número Equivalente de Resistencia a la Picadura – PREN	9
2.2. ACEROS INOXIDABLES	9
2.2.1. Austeniticos	10
2.2.2. Ferriticos	10
2.2.3. Martensiticos	10

III

2.2.4. Duplex o Austeno – Ferríticos	10
2.2.5. Endurecibles por Precipitación	11
2.3. ELEMENTOS DE ALEACION	11
2.3.1. Cromo	12
2.3.2. Níquel	12
2.3.3. Manganeso	12
2.3.4. Silicio	12
2.3.5. Molibdeno	12
2.3.6. Niobio y Titanio	13
2.3.7. Carbono y Nitrógeno	13
2.4. ACEROS INOXIDABLES DUPLEX	13
2.4.1. Aplicaciones de los Aceros Dúplex	16
2.4.2. Microestructura	16
2.4.3. Propiedades Mecánicas	17
2.4.4. Resistencia a la Corrosión	18
2.5. METALURGIA DE LOS ACEROS DUPLEX	20
2.5.1. Contenido de Ferrita	25
2.5.1.1 Diagrama de Schaeffler	26
2.5.1.2 Diagrama WRC	27
2.5.2. Soldabilidad de los aceros dúplex	28
2.5.2.1. Metal de aporte enriquecido en níquel	31
2.5.2.2. Control del aporte térmico	31
2.6. PARTICULARIDADES DEL ACERO DUPLEX S32205	32
2.6.1 Aplicaciones	33

IV

2.6.2	Composición Química	33
2.6.3	Resistencia Mecánica	33
2.6.4	Resistencia al Impacto	34
2.6.5	Resistencia a la Corrosión	36
2.6.5.1	Corrosión generalizada	36
2.6.5.2	Corrosión por picadura	37
2.6.5.3	Corrosión localizada	38
2.6.5.4	Corrosión bajo tensión	38
CAPITULO III.- GENERALIDADES DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO		40
3.1.	CONCEPTOS BASICOS	40
3.1.1	Tanque Cilíndrico Horizontal	41
3.1.2	Tanque Cilíndrico Vertical	41
3.1.2.1	Techo fijo	42
3.1.2.2	Techo flotante	42
3.1.2.3	Sin techo	43
3.2.	NORMA DE DISEÑO Y FABRICACION	43
3.2.1	Diseño del Fondo	44
3.2.2	Diseño del Cuerpo	46
3.2.3	Diseño del Techo	49
3.3.	NORMA DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA	50
3.4.	RECOMENDACIONES PARA EL SOLDEO	52
3.4.1	Juntas Verticales del Cuerpo	52
3.4.2	Juntas Horizontales del Cuerpo	53

3.4.3	Juntas del Piso	54
3.4.3.1	Juntas a traslape	54
3.4.3.2	Juntas a tope	55
3.4.4	Juntas entre Cuerpo y Piso	56
3.4.5	Juntas entre el Techo y Perfil de Coronamiento	56
CAPITULO IV.- ELABORACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA		58
4.1.	PROCESO DE SOLDADURA A EMPLEAR	58
4.1.1	SMAW	58
4.1.2	GMAW	59
4.1.3	GTAW	59
4.1.4	Justificación de la Selección del Proceso de Soldadura	59
4.2.	ELECCION DEL MATERIAL DE APORTE	60
4.2.1	Identificación de Metales de Aporte	60
4.2.2	Herramientas para la Selección	64
4.2.3	Resultados de los Posibles Aportes	64
4.2.3.1	Electrodos tipo níquel	65
4.2.3.2	Electrodos tipo inoxidable	66
4.2.4	Justificación de la Selección del Aporte	68
4.3.	TIPO DE JUNTA	70
4.4.	TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO	71
4.5.	TRATAMIENTO TERMICO POST SOLDADURA	72
4.6.	CARACTERISTICAS ELECTRICAS	72
4.7.	APORTE TERMICO	72

VI

4.8. TECNICA DE SOLDEO A EMPLEAR	73
4.9 LIMPIEZA POSTERIOR ALA SOLDADURA	74
4.10 WPS	75
CAPITULO V.- CALIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA	77
5.1 TIPOS DE ENSAYOS REQUERIDOS	78
5.2 DIMENSIONES PARA CUPONES Y UBICACIÓN DE LAS PROBETAS	79
5.3 INSPECCION VISUAL	80
5.4 ENSAYO DE TRACCION	80
5.5 ENSAYO DE DOBLEZ	82
5.5.1 DobleZ Transversal de Lado	83
5.5.2 DobleZ Transversal de Cara	84
5.5.3 DobleZ Transversal de Raíz	84
5.6 ENSAYO DE CORROSION	86
5.7 ENSAYO DE MACROGRAFIA	87
5.8 ENSAYO DE DUREZA	88
5.9 ENSAYO DE IDENTIFICACION DE FASES INTERMETALICAS	90
5.9.1 Método A	90
5.9.2 Método B	91
CAPITULO VI.- ANALISIS ECONOMICO	95
6.1 CALCULO DE ESPESOR DE PARED CON ACERO 316L	97
6.2 CALCULO DE ESPESOR DE PARED CON ACERO UNS 32205	100
6.3 DIFERENCIAS ENTRE ESPESORES DE PARED	101

VII

6.4 DIFERENCIA EN PESO Y PRECIOS	102
CONCLUSIONES	104
RECOMENDACIONES	105
BIBLIOGRAFIA	106
ANEXOS	108

PROLOGO

El presente trabajo trata sobre la calificación de un procedimiento de soldadura para la fabricación de un tanque de almacenamiento empleando como material base un acero inoxidable dúplex; estos aceros tienen mejores propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión y menor costo que los aceros austeníticos, razón por la cual se plantea su uso en remplazo de los austeníticos. Pero si no se realiza un adecuado ciclo térmico durante el proceso de soldeo pueden perder catastróficamente sus propiedades. Se realizara una secuencia de pasos para la elaboración y la calificación del procedimiento de soldadura y así poder garantizar que la Zona Afectada por el Calor (ZAC) y el metal de soldadura tengan propiedades aceptables según las normas empleadas.

En el primer capítulo se habla sobre el estado actual de materiales inoxidables que se emplean en nuestro país y en los países industrializados, se explica la justificación técnica y económica, se formula el objetivo principal y objetivos específicos del presente trabajo.

En el segundo capítulo se habla de los aceros inoxidables dúplex se detalla sus aplicaciones, propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión, metalurgia y las particularidades del acero dúplex S32205.

El tercer capítulo trata sobre tanques de almacenamiento, se habla ligeramente sobre diseño para poder sustentar los cálculos de espesor de pared realizados en el capítulo 6; se reconocen las normas a emplear durante el desarrollo del trabajo.

En el cuarto capítulo se plasma la secuencia a emplear para poder elaborar adecuadamente el Procedimiento de Soldadura.

En el quinto capítulo se seleccionan los ensayos según norma empleada y además se incluyen ensayos adicionales que nos permitan calificar adecuadamente el Procedimiento de Soldadura y así poder garantizar que el metal de soldadura y la zona afectada por el calor tienen propiedades similares al metal base.

En el sexto capítulo se realizó unos cálculos de espesor de pared de tanques para 2 casos diferentes; el primero empleando plancha de acero austenítico 316L y el segundo plancha de acero dúplex S32205 se realizó comparación en peso y en costos.

Gracias de manera muy especial a mis padres y a mi esposa quienes siempre estuvieron allí cuando más los necesitaba, gracias a mis hermanos por apoyarme, gracias a mi tía y a mis tíos por su apoyo incondicional, y gracias a mi asesor y los ingenieros de la UNI y PUCP por sus enseñanzas impartidas en clase.

CAPITULO I

INTRODUCCION

1.1 ANTECEDENTES.

Históricamente, los tanques de almacenamiento se han construido en acero al carbono con un sobre dimensionamiento por corrosión. Sin embargo cuando se almacenan productos corrosivos, debido al desgaste por corrosión y alto costo de mantenimiento, muchos tanques de almacenamiento son diseñado con un enchapado interior de acero inoxidable, recubrimiento de pintura o protección catódica.

Durante décadas también se han diseñado y construido tanques de almacenamientos de aceros inoxidables austeníticos estos tienen una alta resistencia a la corrosión suficiente para muchas aplicaciones en la industria de la pulpa de papel, alimentaria, azúcar, etc. Sin embargo, es posible reducir los costos de fabricación mediante la utilización de aceros inoxidables dúplex y además estos se pueden usar en ambientes mas corrosivos debido a su mayor resistencia a la corrosión.

El desarrollo industrial moderno, conlleva a la utilización de aceros de mejores propiedades mecánicas, que soporten diversos medios agresivos y a menor precio. Del mismo modo, a razón de que se crean nuevos materiales, los procesos de unión también se hacen mas versátiles, como es el caso de la soldadura como medio de unión entre metales, y su entendimiento es de vital importancia para

conocer los cambios micro estructurales que ocurren en la zonas de unión, en donde se produce la fusión del material.

El acero inoxidable dúplex S32205 comparado con el austenítico AISI 316L tiene mejor resistencia mecánica y a la corrosión pero es susceptible a la formación de fases perjudiciales durante un inadecuado proceso de soldadura, lo que se traduce en una disminución en las propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión del mismo; para evitar esto es importante entender el ciclo térmico durante el proceso de soldeo y conocer mediante que ensayos podemos evaluar que estas propiedades no han sido disminuidas por debajo del criterio de aceptación de la norma en uso.

El empleo de los aceros inoxidables duplex es recurrente en estos tiempos en la industria moderna, que requieren elementos de alta resistencia mecánica en medios altamente corrosivos. Hasta hace poco tiempo, en nuestro medio se conocía poco de estas aleaciones así como muy poco de los procesos de soldeo para unirlos. Por lo tanto el desarrollo y calificación de un procedimiento de soldadura adecuado para unir estos materiales es vital en el proceso constructivo y los controles de calidad asociados a las juntas soldadas a realizar.

1.2 JUSTIFICACION DEL TEMA

El crecimiento del Perú en su economía esta trayendo una mayor inversión privada en áreas que antes no se invertían, con esto se esta llevando a cabo novedosas construcciones con tecnología muy moderna en la cual se están usando aceros inoxidable dúplex por lo cual se hace necesario una especialización y mejor entendimiento de la propiedades y procesos de soldadura de estos materiales para garantizar la producción de uniones soldadas de calidad.

Hoy en día un material muy usado en los países industrializados son los aceros inoxidable dúplex, esto debido a su buena resistencia en presencia de cloruros, buena resistencia mecánica y bajo costo; su uso se da en la fabricación de tanques, de estructuras, recipientes a presión y otros, a través de procesos de soldadura. Para esto se desarrollan diversos procedimientos de soldadura los cuales pueden ser de forma decisiva para que el material soldado mantenga sus propiedades originales.

La exigencia de calidad de las juntas soldadas de cualquier instalación industrial o de procesamiento de materiales es vital. Cualquier falla que se pueda producir, conllevaría a pérdidas económicas por paradas de procesos, equipos, pérdidas de producción y lo que sería peor, la pérdida de vidas humanas.

1.3 OBJETIVO GENERAL.

Elaborar una secuencia de pasos para obtener un procedimiento de soldadura (WPS) calificado para la fabricación de un tanque de almacenamiento, empleando como material base un ACERO INOXIDABLE DUPLEX S32205.

1.4 OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- Elaborar el WPS (welding procedure specification), mediante una revisión de conceptos teóricos y prácticos de soldabilidad de aceros duplex.
- Establecer los ensayos requeridos por la norma y ensayos adicionales que nos permitan calificar satisfactoriamente el procedimiento de soldadura.
- Establecer los procedimientos y criterios de aceptación de los ensayos a emplear para la calificación del WPS.
- Identificar las ventajas técnicas económicas del acero dúplex S32205 frente a los austeníticos tradicionales.

CAPITULO II

ACEROS INOXIDABLES DUPLEX

2.1 CONCEPTOS BASICOS.

2.1.1 Sensibilización.

La sensibilización de los aceros inoxidables ocurre cuando se exponen a temperaturas entre 500 y 800 °C durante un tiempo determinado (proceso de soldadura), produciendo la precipitación de carburos de cromo hacia los límites de grano, con lo cual se reduce la concentración de cromo en sus cercanías, causando disminución de la resistencia a la corrosión, de la ductilidad y la tenacidad.

Existen soluciones para este problema, que es bajar el contenido de Carbono evitando así la precipitación del Cromo. Se considera en la práctica un 0.03% de Carbono como máximo para prevenir la sensibilización.

Un segundo método de prevención es añadir a la solución Titanio, Niobio o Tantalio. Estos tres elementos tienen alta afinidad con el Carbono y preferentemente forman Carburos, dejando el Cromo en solución. El último método es raramente usado y consiste en un recocido de la soldadura, una vez finalizada esta. El recocido se hace a una temperatura entre 1038 y 1093 ° C, en donde los Carburos que se hubiesen producido, se disolverán. Luego, un enfriamiento rápido, por medio de un templado en agua, los retendrá en solución, previniendo la sensibilización.

2.1.2 Formación de fisuras y el rol de la Ferrita.

Bajo condiciones de uniones extremas, a veces se producen fisuras en la soldadura o alrededor de ella, conocidas como fisuras de solidificación y de licuación. Se ha determinado que una pequeña cantidad de ferrita, alrededor de un 2 a 3 %, liberará a la soldadura de las fisuras de solidificación. Principalmente porque la ferrita aumenta el tamaño límite del grano, aumentando el área disponible de este, lo cual reduce la concentración de segregaciones de impurezas dañinas, que permanecen dentro de los límites y propicia la nucleación de fisuras.

2.1.3 Fase Sigma.

La fase sigma es un compuesto inter metálico con una composición alrededor de 45% Cr – 55% Fe, es duro y frágil, que puede ser solamente removido mediante un calentamiento a la temperatura de 1010 °C, en donde este se disolverá. La formación de esta fase, se ve favorecida si las partes fabricadas son destinadas para servicios con rangos de temperaturas entre 590 °C a 930 °C, o porque las piezas fabricadas requieren tener un tratamiento térmico de alivio de tensiones sobre estos rangos, reduciendo notablemente su ductilidad. A temperatura de 730°C la fase sigma se puede formar rápidamente, pero a bajas temperaturas es necesario un tiempo mayor para su formación. Una variación en la composición, cambiará la velocidad de formación de esta fase y la temperatura a la cual se inicia. El Molibdeno y el Niobio aceleran la reacción sigma, mientras que el Níquel eleva al máximo la temperatura a la cual esta fase aún no está presente.

2.1.4 Fase Chi (χ).

Aunque menos conocida que la fase σ , la fase intermetálica Chi precipita en determinados aceros inoxidables dúplex cuando son sometidos a tratamientos

térmicos de 6 a 10 horas, entre 700°C – 900°C. Su nucleación frecuentemente tiene lugar en la interfase ferrita / austenita y crece en la matriz delta. La fase χ , como la σ , es frágil y quebradiza, por lo que, su presencia es indeseable. El efecto que provoca esta fase sobre las propiedades del material es difícil de cuantificar, debido a que suele coexistir con la fase σ y su proporción respecto a ésta es muy baja.

2.1.5 Número equivalente de resistencia a la picadura – PREN.

Este número que proviene de Pitting resistance equivalent numbers (PREN), es una forma teórica de comparación de la resistencia a la corrosión por picadura de los diversos tipos de aceros inoxidable, en base a su composición química. Este número es útil para la clasificación y comparación de los distintos grados de acero inoxidable, pero no puede utilizarse para predecir si un grado en particular será adecuado para una aplicación dada, donde la corrosión por picaduras puede ser un peligro.

Generalmente los elementos de aleación que afectan el PREN son el Cromo, molibdeno, nitrógeno y el tungsteno la versión de la fórmula más comúnmente usada es:

$$\text{PREN} = \text{Cr} + 3.3(\text{Mo} + 0.5\text{W}) + 16\text{N} \dots \dots \dots (2.1)$$

2.2 ACEROS INOXIDABLES.

Son aceros que poseen un elevado contenido en cromo (mayor del 10,5%), lo cual potencia la formación de una capa pasiva estable, con óxido de cromo como uno de sus elementos principales, que protege su superficie de la corrosión. Dicha capa pasiva se vuelve a reconstruir cuando se la daña, si el ambiente es suficientemente

oxidante, manteniendo una protección permanente del acero. El níquel también es un elemento de aleación importante en muchos de estos aceros, a los que confiere un aumento en la resistencia a la corrosión y en la tenacidad. Los aceros inoxidables se clasifican, dependiendo de la composición química y de sus fases presentes así como de sus porcentajes, en:

2.2.1 Austeníticos.

De composición básica de 18% de cromo y 8% de níquel, son los más comúnmente utilizados (entre el 50 y el 70% de la producción total de aceros inoxidables), y dentro de los austeníticos el AISI 304 es por lejos el más común.

2.2.2 Ferríticos.

Contienen básicamente cromo en porcentajes que varían entre 15% y 20% con un bajo contenido de carbono y nada de níquel. Son menos dúctiles que los austeníticos y presentan menor soldabilidad. El más utilizado de los ferríticos es el AISI 430 que contiene 17% de cromo y como máximo 0,12% de carbono.

2.2.3 Martensíticos:

Tienen un relativamente alto contenido de carbono (0,1 a 1,2%) comparado a otros aceros inoxidables. Contienen básicamente cromo entre 12 y 18%. Pueden someterse a un tratamiento de temple para dar una estructura martensítica de elevada dureza y baja ductilidad.

2.2.4 Dúplex o austeno-ferríticos: Son bifásicos, con proporciones similares de austenita y ferrita, y así combinan las ventajas de las dos fases. La composición típica es 22% de cromo y 5% Ni. Hablaremos en detalle de los dúplex en la parte siguiente.

2.2.5 Endurecibles por precipitación: Su composición suele ser 17% de cromo y 7% de níquel más pequeñas cantidades de elementos como Al, Cu, Ti y Mo que hacen posible el tratamiento de envejecimiento. Tienen una gran resistencia a temperaturas elevadas y poseen una alta resistencia mecánica.

2.3 ELEMENTOS DE ALEACION.

Los elementos de aleación son los responsables de que cada acero inoxidable tenga una microestructura determinada; pues una pequeña variación de estos ocasiona cambios en esta. Entre estas tenemos elementos alfa y gamma.

Los principales elementos promotores de la ferrita (alfa) son:

- Cromo.
- Molibdeno.
- Silicio.
- Niobio.
- Titanio.
- Aluminio.
- Vanadio.
- Tungsteno.

Los principales elementos promotores de la austenita (gamma) son:

- Níquel.
- Manganeso.
- Carbón.
- Nitrógeno.
- Cobre.
- Cobalto.

2.3.1 Cromo.

La misión primaria es suministrar protección al acero. Forma en la superficie del acero un óxido estequiométrico $(Fe\ Cr)_2O_3$. Es un fuerte formador de carburos $M_{23}C_6$ ($Cr_{23}C_6$), y puede formar Nitruros en aceros inoxidables ferríticos y dúplex Cr_2N . Influye en la formación de compuestos intermetálicos (fases sigma y chi).

2.3.2 Níquel.

La misión primaria es promover la fase austenítica. Esto amplía el campo austenítico permitiendo austenita a temperatura ambiente.

2.3.3 Manganeso.

En los aceros inoxidables austeníticos está presente en el rango entre 1-2%. En los ferríticos y martensíticos comúnmente se presenta en menos del 1%. Se adiciona para evitar fisuras (hot shortness) durante la solidificación.

2.3.4 Silicio.

Actúa como desoxidante durante la fundición. Mejora la resistencia a la corrosión a alta temperatura. En los metales de aporte se encuentran valores elevados para mejorar la fluidez.

2.3.5 Molibdeno.

En aceros inoxidables austeníticos, ferríticos y dúplex se adiciona en porcentajes de hasta 6% o más para mejorar la resistencia a la corrosión por picadura o crevice. En aceros inoxidables austeníticos mejora la resistencia a alta temperatura. Por ejemplo la adición de 2% Mo en un acero inoxidable 18Cr-8Ni resulta en un incremento de 40% de resistencia a 760°C.

2.3.6 Niobio y Titanio.

El **Nb** y **Ti** se adicionan a los aceros inoxidables austeníticos para proveer estabilización del C y evitar corrosión intergranular, no se disuelven durante la soldadura por lo que evitan la formación de carburos ricos en Cr.

2.3.7 Carbono y Nitrógeno.

En los aceros inoxidables el C esta debajo del 0,1% (la excepción son los aceros inoxidables martensíticos); para soldadura se utilizan los grados Low Carbón (L) donde el C se mantiene debajo de 0,04% para evitar la formación de carburos. El Nitrógeno se adiciona intencionalmente en algunos aceros inoxidables como endurecedor por precipitación.

2.4 ACEROS INOXIDABLES DUPLEX.

La denominación DUPLEX se aplica a un tipo de acero inoxidable, cuya composición química ha sido cuidadosamente ajustada para lograr una estructura cristalina mixta, de aproximadamente la mitad de ferrita y austenita. Eso se logra incorporando a un acero ferrítico, una cantidad pequeña y controlada de Níquel (a veces Mn y N). La aleación resultante presenta características mecánicas muy superiores a la de un acero inoxidable convencional austenítico, permitiendo el uso de menores espesores, con el consiguiente ahorro de material y menor costo. A esto se suma muy buena resistencia a la corrosión uniforme y localizada, como corrosión por picadura (pitting), corrosión en grietas (crevice) y corrosión bajo tensión o cracking (SCC), en los casos mas críticos de altas concentraciones de cloruro, presencia de fuertes agentes reductores y presencia de sulfuro de hidrogeno. También poseen buena soldabilidad, si se utiliza la técnica adecuada.

La familia de los aceros inoxidable DUPLEX se puede dividir en 3 grandes categorías:

- Aceros dúplex sin molibdeno
- Aceros dúplex 22Cr (con 22% de cromo)
- Aceros dúplex 25Cr (25% de cromo).

Los dúplex 22 Cr han sido utilizados desde 1970 en las plataformas marinas, en la industria del petróleo. Desde fines de la década de los 80 los dúplex 25Cr (llamados súper dúplex), de mayor resistencia mecánica, se han introducido gradualmente en ese campo.

Igualmente existe una segunda clasificación un poco más técnica sobre estos aceros la cual es la que da **Nilson**:

- Baja aleación: De bajo costo esencialmente libre Molibdeno. Acero Inox. Dúplex del tipo 23Cr – 4Ni – 0.1N diseñados para reemplazar al AISI 304 y 316 donde la resistencia a la corrosión localizada es requerida. Poseen un PREN aproximadamente de 25.
- Mediana aleación: Aceros Inox. Dúplex del tipo 22 Cr – 5Ni – 3Mo – 0.17N, con una resistencia a la corrosión mayor a un AISI 316 e incluso mayor que los grados súper austeníticos. Poseen un PREN aproximadamente entre 30-35.
- Alta aleación: Aceros Inox. Dúplex contiene un 25% de Cromo con variaciones de porcentajes de Molibdeno y Nitrógeno, adiciones de Cobre y Tungsteno. Poseen un PREN entre 35-39.
- Aceros Inoxidables Súper Dúplex: Son del tipo 25Cr - 7Ni - 3.7Mo – 0.27N, con un PREN mayor a 40, especialmente usados en ambientes muy corrosivos.

La principal razón para evolucionar hacia los aceros dúplex es el costo. Su menor porcentaje de níquel (un elemento muy caro) y una mayor resistencia mecánica, que permiten ahorrar hasta un 25% en peso, reducen el costo de la instalación y su elevada resistencia a la corrosión localizada.

Las propiedades de los aceros dúplex son muy sensibles a variaciones en la composición química especialmente de cromo, molibdeno, níquel y nitrógeno. El Molibdeno y nitrógeno son importantes en determinar la resistencia a la corrosión por picaduras y grietas, mientras que el níquel es fundamental para mantener el equilibrio austenita/ferrita de la aleación.

Los aceros súper dúplex, como ya se mencionó, poseen una mayor resistencia a la corrosión por picadura uniforme y grietas, en un ambiente con cloruro, su PREN alrededor de 42.5 y una resistencia mecánica de 109 Ksi, superiores en ambos sentidos a los aceros dúplex convencionales.

Si es recocido (1050-1125 °C) y templado la aleación contiene entre 30-50% de fase ferrita y el resto de austenita. Los aceros dúplex son más sensibles a la precipitación de carburos, entre granos de aleación, que los aceros austeníticos. Sometido a un calentamiento de 700-1000 °C puede haber formación de fase sigma y en el rango de 325-500 °C se puede tornar quebradizo. Sin embargo en las operaciones normales de soldadura y calentamiento la microestructura no forma ningún precipitado o fase que pueda producir fragilidad.

Se puede conformar en caliente (1025-1200 °C) seguido de un recocido y templado. Para el conformado en frío se requiere más esfuerzo que para los austeníticos normales. Si una deformación en frío excede el 10% se recomienda un recocido. Un recocido para disolución de precipitados se debe aplicar como mínimo a 1050 °C.

Tienen buena soldabilidad con las técnicas SMAW, GMAW, FCAW, GTAW, PAW, SAW. Como material de aporte debe usarse un metal que preserve la estructura dúplex.

2.4.1 Aplicaciones de los Aceros Duplex:

- Intercambiadores de calor
- Calentadores de agua
- Recipientes a presión
- Depósitos de almacenaje
- Rotores, hélices, ejes
- Digestores y otros equipos de producción de pulpa y papel
- Tanques de carga en cargueros químicos
- Plantas de desalinización y sistemas con agua marina
- Purificadores de gases de combustión

2.4.2 Microestructura.

La composición química de los aceros dúplex está equilibrada (tabla 2.1) para garantizar que, en estados de recocido de disolución, presenten una estructura con cantidades aproximadamente iguales de ferrita y austenita tal como se muestra en la figura 2.1.

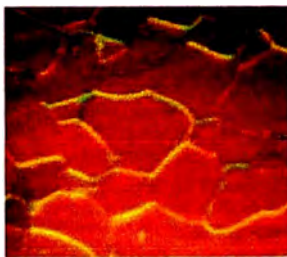
Los aceros dúplex se solidifican inicialmente con una estructura completamente ferrítica. A continuación pasan por una transformación de fase en la cual la austenita primaria y secundaria crece en los bordes del grano de ferrita. La cantidad de austenita depende de la composición y de la velocidad de enfriamiento. En la producción de chapas, bobinas, tuberías, etc., se puede utilizar un tratamiento térmico controlado para obtener un equilibrio del 50% de austenita y ferrita.

Tabla 2.1 Composición química de los aceros inoxidable austeníticos y dúplex.

Outokumpu steel name	International steel No		Chemical composition, % by weight Typical values						
	EN	ASTM	C	N	Cr	Ni	Mo	Others	
Duplex	LDX 2101*	1.4162	S32101	0.03	0.22	21.5	1.5	0.3	5Mn
	2304	1.4362	S32304	0.02	0.10	23	4.8	0.3	-
	LDX 2404™	1.4662	S82441	0.02	0.27	24	3.6	1.6	3Mn
	2205	1.4462	S32205*	0.02	0.17	22	5.7	3.1	-
	2507	1.4410	S32750	0.02	0.27	25	7.0	4.0	-
Austenitic	4307	1.4307	304L	0.02	-	18.1	8.1	-	-
	4404	1.4404	316L	0.02	-	17.2	10.1	2.1	-
	904L	1.4539	N08904	0.01	-	20	25	4.3	1.5Cu
	254 SMO®	1.4547	S31254	0.01	0.20	20	18	6.1	Cu

*Also available as S31903

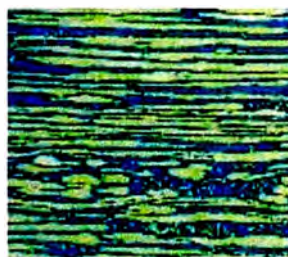
Ferritic Structure



Add Nickel



Duplex Structure



Add Nickel



Austenitic Structure

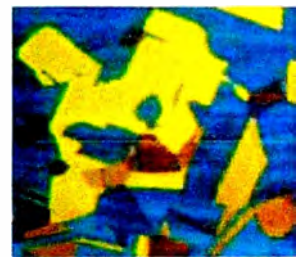


Figura 2.1 Se muestra la estructura ferrítica la cual conforme se agrega níquel cambia a estructura dúplex, y por último a austenítica.

2.4.3 Propiedades Mecánicas.

Los aceros dúplex se caracterizan por su gran resistencia mecánica, que es mayor que los aceros inoxidable austeníticos tal como se muestra en la figura 2.2. La alta resistencia a la tracción también significa que las propiedades de fatiga son muy buenas. No obstante, la resistencia a la fatiga depende en gran medida de la forma de la pieza. Las propiedades de fatiga de las uniones soldadas son también claramente inferiores. El método de soldadura y el tipo de unión son de gran importancia. Por ejemplo, una unión con soldadura TIG tiene propiedades considerablemente mejores que una realizada con electrodos revestidos.

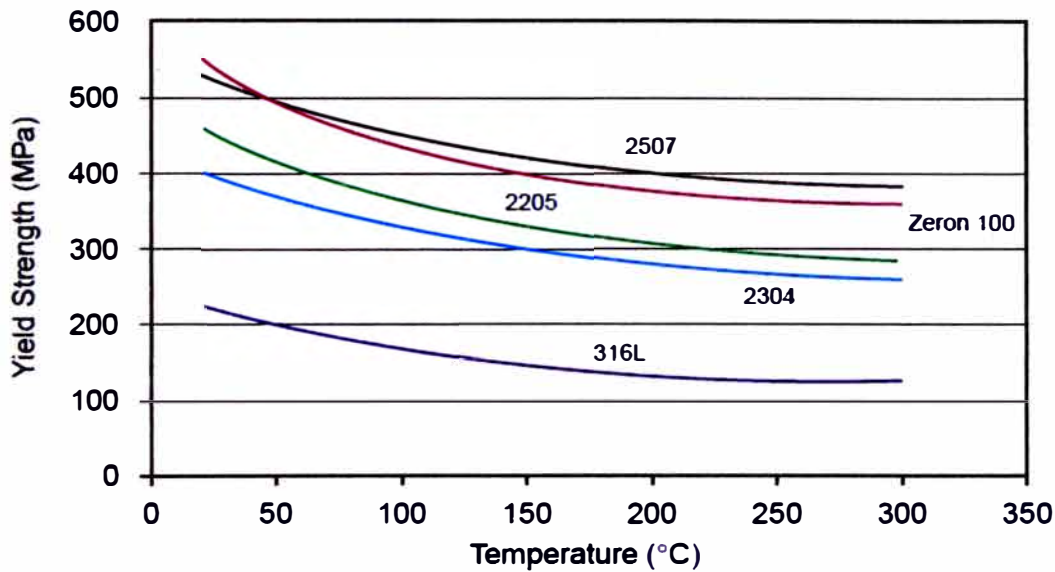


Figura 2.2 Comparación de Resistencia Mecánica entre los aceros dúplex y el austenítico 316L

Debido a que su ductilidad es inferior a la de los aceros austeníticos, ver tabla 2.2, los aceros dúplex no son aptos para utilizar a bajas temperaturas ($< -40^{\circ}\text{C}$).

Tabla 2.2 Porcentaje de elongación de los aceros duplex y austeníticos

Grade	Min. Elongation (Pct.)
2304	25
2205	25
25 Cr Duplex	15
Superduplex	15
304/304L	40
316/316L	40

2.4.4 Resistencia a la corrosión.

Los aceros dúplex ofrecen una amplia variedad de propiedades contra la corrosión. El elevado contenido de cromo permite que la resistencia a la corrosión sea generalmente muy buena en la mayoría de los ambientes. Esto se aplica tanto a la corrosión por picadura como por fisuras. La gran resistencia mecánica implica

también que la resistencia a la corrosión bajo tensión sea muy buena. Debido al bajo contenido de carbono, la corrosión intergranular rara vez supone un problema.

En términos generales, la resistencia a la corrosión aumenta con el incremento del contenido de níquel, cromo y nitrógeno.

En general, la resistencia a la corrosión de una unión soldada es ligeramente inferior a la del metal base, ver figura 2.3. Esto se debe sobre todo al ciclo de temperatura al que se ha sometido la soldadura y la zona afectada por el calor (ZAC), a la forma de la superficie soldada y a los contaminantes y a los defectos generados al soldar. Para obtener la mejor resistencia posible a la corrosión, las superficies de la soldadura y de la chapa deben estar limpias y lisas. Después de soldar, se debe decapar tanto el metal de soldadura como la zona afectada por el calor (ZAC).

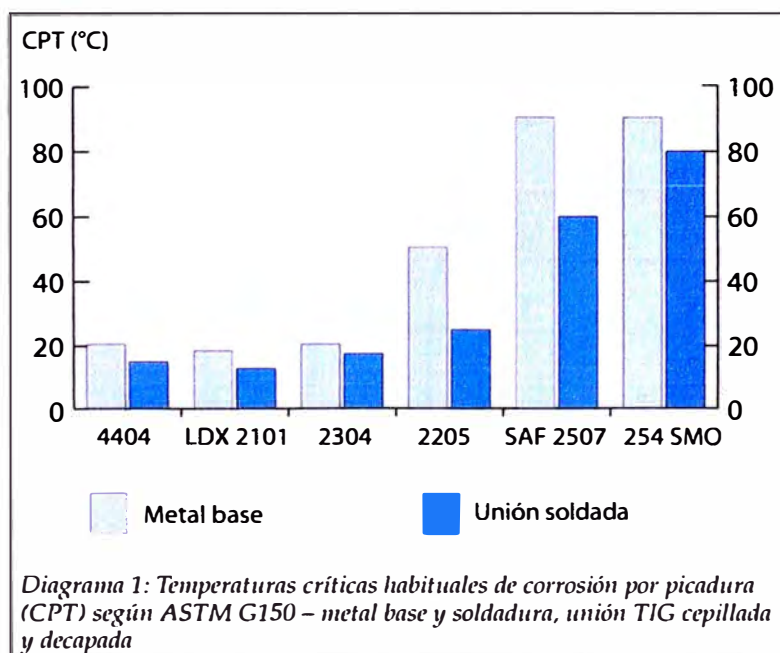


Figura 2.3 Comparación de temperaturas críticas de corrosión por picadura para aceros dúplex y austeníticos – metal base y soldadura

2.5 METALURGIA DE LOS ACEROS DÚPLEX.

El diagrama de fase ternario del hierro-cromo-níquel es un mapa del comportamiento metalúrgico de los aceros inoxidable dúplex. Una sección del diagrama ternario con 68% de hierro (Figura 2.4) ilustra que estas aleaciones solidifican como ferrita, una parte de esta luego se transforma en austenita mientras que la temperatura baja alrededor de 1000 °C (1832 °F), esto depende de la composición química de la aleación. Hay poco cambio adicional al del equilibrio de la ferrita-austenita a temperaturas más bajas. Termodinámicamente, porque la austenita está formándose de la ferrita, es imposible que la aleación vaya más allá del nivel del equilibrio de la austenita. Sin embargo, al llegar a temperaturas más bajas, carburos, nitruros, fase sigma y otras fases intermetálicas son componentes posibles de la microestructura.

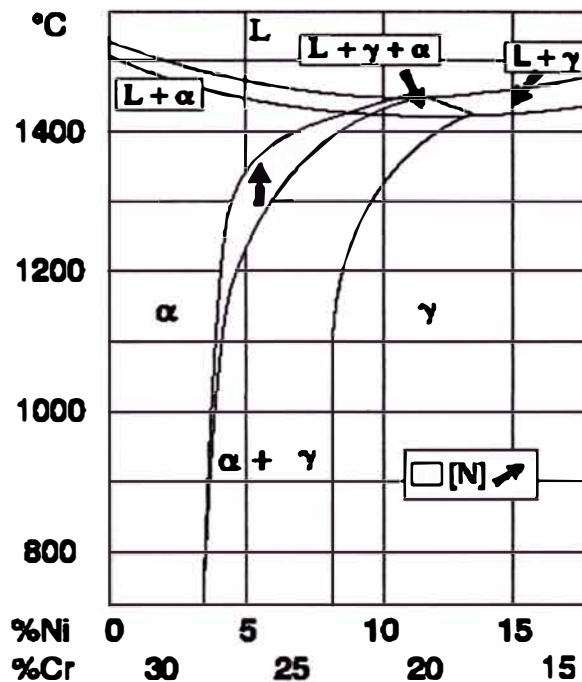


Grafico 2.4. Sección a través del diagrama de fase ternario FE-Cr-Ni con 68% de hierro(cambios pequeños en el contenido del níquel y del cromo tienen una influencia grande en la cantidad de austenita y ferrita en aceros inoxidable dúplex.). Se nota claramente que el nitrógeno favorece la formación de austenita, levantado la curva de transformación de ferrita a austenita [4].

Las cantidades relativas de ferrita y austenita que están presentes en un acero duplex depende de la composición química y la historia térmica de estos. Pequeños cambios en la composición puede tener un gran efecto sobre la fracción de volumen relativo de estas dos fases como indica el diagrama de fases.

Las tendencias de los elementos individuales para promover la formación de austenita o ferrita aplica razonablemente bien a los grados dúplex. El objetivo es mantener el equilibrio deseado de las fases en un acero inoxidable dúplex lo cual es logrado principalmente mediante el ajuste de cromo, molibdeno, níquel, y el contenido de nitrógeno; y también por el control del ciclo termico. Sin embargo, debido a que la velocidad de enfriamiento determina la cantidad de ferrita que se puede transformar en austenita, las tasas de exposiciones a altas temperaturas pueden influir en el equilibrio de fase. Debido a que en un enfriamiento rápido se favorece la retención de ferrita, es decir se tiene más cantidad de ferrita que la de equilibrio. Por ejemplo, un bajo aporte térmico de soldadura en plancha de sección gruesa podría resultar en exceso de ferrita en la ZAC, debido al rápido enfriamiento de esta.

Un efecto beneficioso del nitrógeno es que eleva la temperatura a la que la austenita se empieza a formar a partir de la ferrita. Por lo tanto, incluso en velocidades de enfriamiento relativamente rápidas, se puede llegar a obtener el porcentaje de fases deseadas. En la segunda generación de aceros inoxidables dúplex, este efecto reduce el problema de exceso de ferrita en la ZAC.

Debido a que la fase sigma se forma a temperaturas inferiores, de la reformación de la austenita a partir de la ferrita, durante el enfriamiento, el objetivo de evitar la fase sigma en productos de acero se consigue mediante la selección de una tasa

apropiada de enfriamiento intermedia que favorece la reformación de la austenita a alta temperatura y retarda la formación de la fase sigma a bajas temperatura. Afortunadamente, esta velocidad de enfriamiento intermedio es bastante rápido, lo que permite el uso de temple al agua.

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

Fase sigma, carburos perjudiciales y los nitruros pueden formarse en cuestión de minutos a ciertas temperaturas. Por lo tanto, los tratamientos térmicos requeridos para procesar y fabricar deben tomar la cinética de la reacción de la formación de la fase a considerar para asegurarse de obtener buenas propiedades de resistencia a la corrosión y resistencia mecánicas.

Un diagrama isotérmico de la precipitación para los aceros inoxidable dúplex 2304, 2205, y 2507 se muestran en figura 2.5. El comienzo de la precipitación de carburos

y de nitruros de cromo comienza relativamente tarde en un tiempo de 1 a 2 minutos en la temperatura. Esto es más lento que en los grados ferríticos o los grados austeníticos altamente aleados, y son debidos, en parte, a la alta solubilidad del carbón y del nitrógeno en la fase austenítica de bajo níquel y posiblemente a un efecto del nitrógeno para retardar la precipitación de carburos.

Los Grados dúplex que son más aleados en cromo, molibdeno y níquel tendrá cinética sigma y chi más rápido que 2205, es decir los que tienen menor contenido de aleación son más lentos. Esto es ilustrado por las curvas de transformación en la figura 2.5 mostrando un inicio más precoz en la formación de la fase sigma y chi , en la aleación 2507 y uno más lento en la aleación 2304.

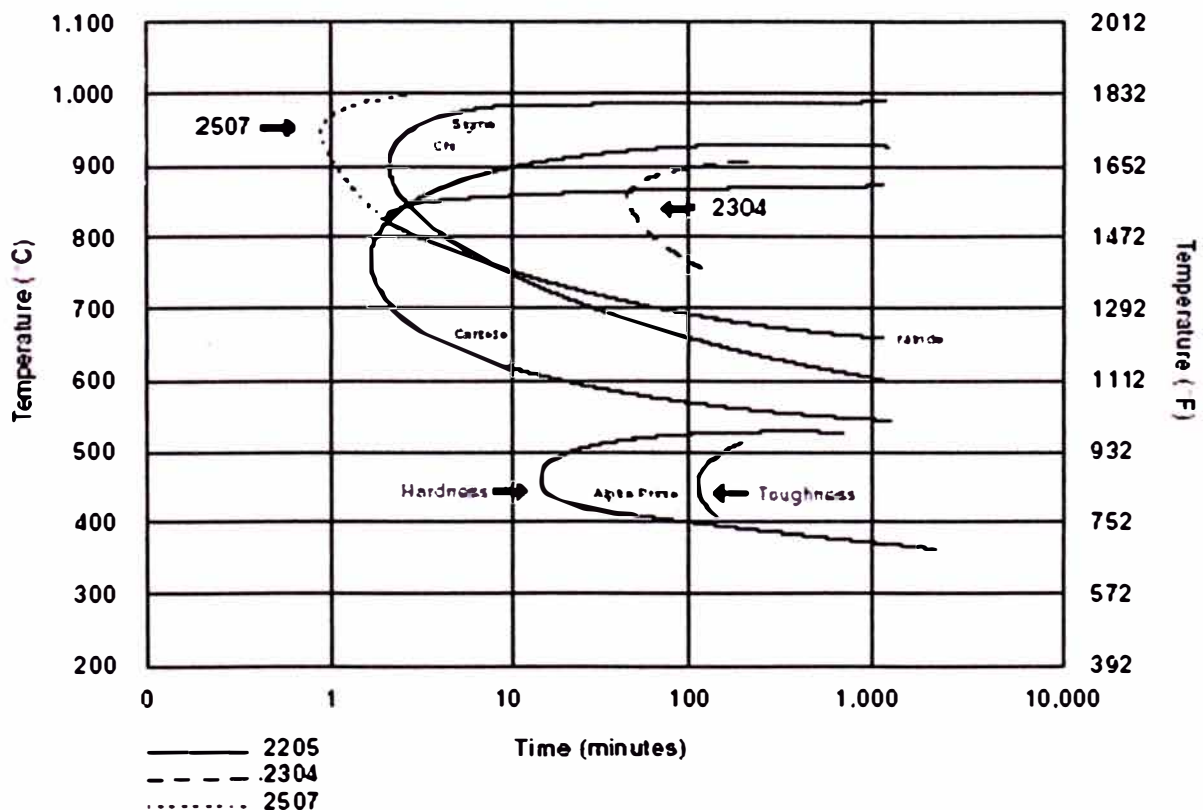


Figura 2.5. Diagrama isotérmico de la precipitación para el acero inoxidable dúplex 2205, recocido en 1050°C (1920° F). (Los grados dúplex 2304 y 2507 se muestran para comparación) [4].

La fase Alfa primaria precipita dentro de la fase ferrítica, y sus efectos son a endurecer y fragilizar la ferrita. Afortunadamente, debido los aceros inoxidable dúplex contienen 50% de austenita, este efecto de endurecimiento y fragilización no es tan perjudicial como en los aceros ferríticos.

La pérdida de tenacidad debido a la precipitación de alfa primaria se produce a una velocidad mas lenta que la de endurecimiento (Figura 2.5). En consecuencia la fragilización por la precipitación de alfa primaria no suele ser un motivo de preocupación durante la fabricación. Sin embargo, el límite superior de temperatura de servicio debe ser controlado debido a la formación de alfa primaria; pues una prolongada exposición a temperaturas elevadas puede ocasionar perdida de la tenacidad. Por esta razón los códigos de diseño de recipientes a presión han establecido limites superiores de las temperaturas de diseño. El código alemán TÜV distingue entre construcciones soldadas y sin soldar; además es más conservador que el código ASME para Calderas y Recipientes a Presión. Los límites máximos de temperatura para recomendados por estos códigos para los aceros inoxidables dúplex se muestra en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Valores máximos de temperatura para los valores máximos de tensión admisible recomendado por los códigos de diseño de recipientes a presión.

Grade	Condition	ASME		TüV	
		°C	°F	°C	°F
2304	Unwelded	315	600	300	570
2304	Welded. matching filler	315	600	300	570
2304	Welded with 2205/2209	315	600	250	480
2205	Unwelded	315	600	280	535
2205	Welded	315	600	250	480
2507	Seamless tubes	315	600	250	480
Alloy 255	Welded or unwelded	315	600	–	–

Al observar la figura 2.5 notamos que durante el enfriamiento de los aceros inoxidables dúplex pueden aparecer precipitados no deseados; en la tabla 2.4 se resume las reacciones de precipitación mas importantes y los rangos de temperatura en la cual estos se producen.

Tabla 2.4 Temperaturas típicas para características de los aceros dúplex

	2205		Superduplex	
	°C	°F	°C	°F
Solidification range	1445 to 1385	2630 to 2525	1450 to 1390	2640 to 2535
Scaling temperature in air	1000	1830	1000	1830
Sigma phase formation	700 to 975	1300 to 1800	700 to 975	1300 to 1800
Carbide precipitation	450 to 800	840 to 1470	450 to 800	840 to 1470
475C/885F embrittlement	350 to 525	650 to 980	350 to 525	650 to 980

2.5.1 Contenido de Ferrita.

La determinación del contenido de ferrita en números de ferrita (FN) de acuerdo con el estándar AWS A4.2-91 es actualmente, el mejor definido, método no destructivo para la determinación de un valor representativo de contenido de ferrita. Sin embargo, este valor no debe ser confundido con el porcentaje volumétrico real. Los métodos ópticos también se especifican y se aplican en la práctica industrial debido a las limitaciones de la determinación FN en la ZAC de las soldaduras.

Especificaciones aceptables del contenido de ferrita debe darse siempre teniendo en cuenta el hecho de que una amplia gama de contenidos de ferrita existe siempre en el metal de soldadura fundido y la ZAC. Esta es una consecuencia inevitable de las diferencias en la composición química debido a la variación de la dilución del material base y de las variaciones en los ciclos térmicos de soldeo para las diferentes regiones.

Por lo tanto, es inútil especificar un rango de contenido de ferrita demasiado estrecho. Afortunadamente, no hay necesidad de restringir mucho el contenido de ferrita, la experiencia práctica demuestra que las propiedades aceptables se pueden obtener de un rango bastante amplio de contenido de ferrita.

Las recomendaciones generales para el contenido de ferrita son como sigue: El metal de soldadura debe tener un contenido de ferrita en el rango de 30-100 FN (que corresponde a aproximadamente el 22% - 70% en volumen). Una restricción de un máximo de 85 FN (aproximadamente 60% en volumen) puede ser necesaria en lugares expuestos a un ambiente corrosivo o donde el hidrógeno difusible y la tensión puede iniciar agrietamiento por hidrógeno.

El contenido real de Ferrita se puede determinar mediante instrumentos de laboratorio sensibles al magnetismo o bien se puede estimar por medio de un examen metalográfico o a través de gráficos especialmente diseñados conociendo la composición química del metal depositado.

Para el presente estudio solo emplearemos los métodos gráficos los cuales se expondrán a continuación.

2.5.1.1 Diagrama de Schaeffler.

Los ejes del diagrama contienen formulas (2.1 y 2.2) para establecer el contenido de Ni equivalente (en el eje de las y) y Cromo equivalente (en el eje de las x). Este diagrama no incluye el contenido de Nitrógeno.

$$\text{Cromo equivalente} = \%Cr + \%Mo + 1.5 \times \%Si + 0.5 \times \%Nb \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\text{Niquel equivalente} = \%Ni + 30 \times \%C + 0.5 \times \%Mn \dots\dots\dots (2.3)$$

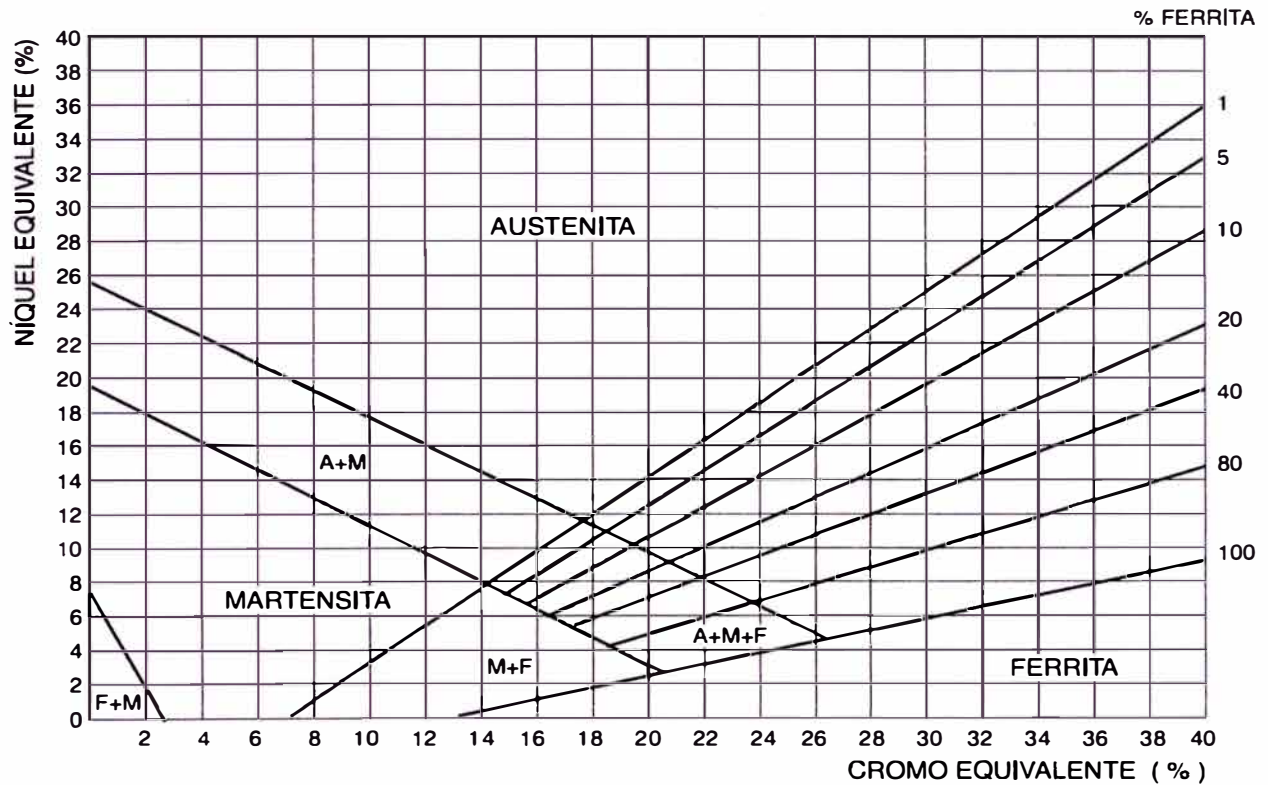


Figura 2.5 Diagrama de Schaeffler

2.5.1.2 Diagrama WRC (1988).

En 1980 el subcomité de soldadura de Aceros Inoxidables del Welding Research Council inicia una serie de actividades para modificar el diagrama de Schaeffler y DeLong con el fin de modificar la predicción de ferrita delta en el metal de soldadura ampliando de 0 a 100 el FN. Proponiendo el diagrama WRC – 1988. Se recomienda utilizar el diagrama WRC en el empleo de aceros inoxidables dúplex debido a que este diagrama si se considera el efecto del contenido de nitrógeno.

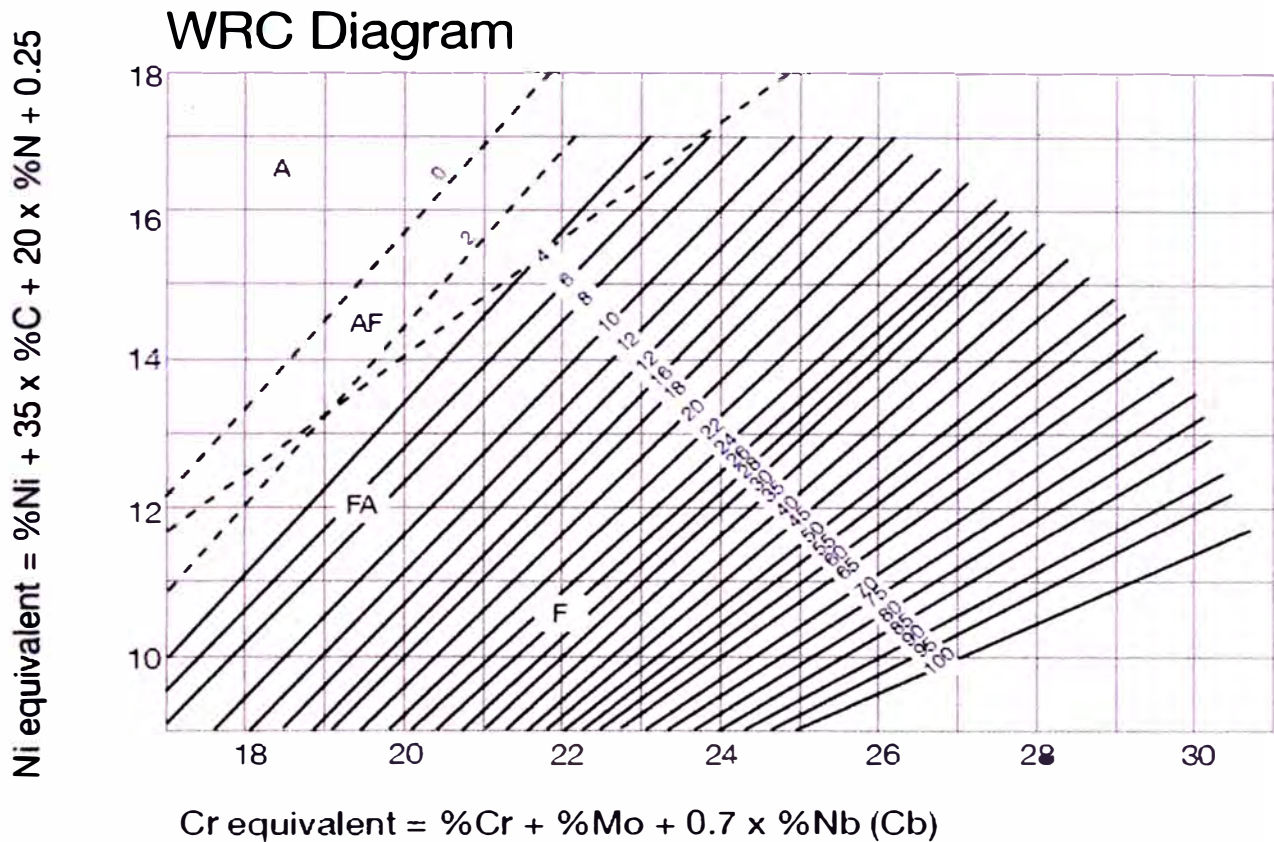


Figura 2.6 Diagrama WRC generalmente empleado para aceros dúplex.

2.5.2 Soldabilidad de los aceros dúplex.

El acero inoxidable dúplex presenta en su microestructura una fase dual de ferrita y austenita la cual le confiere buena resistencia mecánica y a la corrosión superiores a las calidades austeníticas y ferríticas; poseen además una posición intermedia en cuanto a la conductividad térmica y a la dilatación lineal, que serán factores a tomarse en cuenta durante la ejecución de las soldadura.

La soldabilidad de estos aceros ocupa una posición intermedia entre ambos tipos de estructuras. Su punto débil es la Zona Afectada por el Calor, (ZAC), y hasta cierto punto el metal de soldadura. En cambio el agrietamiento en caliente no es un problema, a causa de su elevado contenido de ferrita.

Soldar un material implica calentarlo para poder obtener una unión o simplemente refundir una zona específica, con lo cual de acuerdo al ciclo térmico de soldeo

(figura 2.7) se puede provocar la precipitación de carburos como de fases frágiles como la fase sigma (σ).

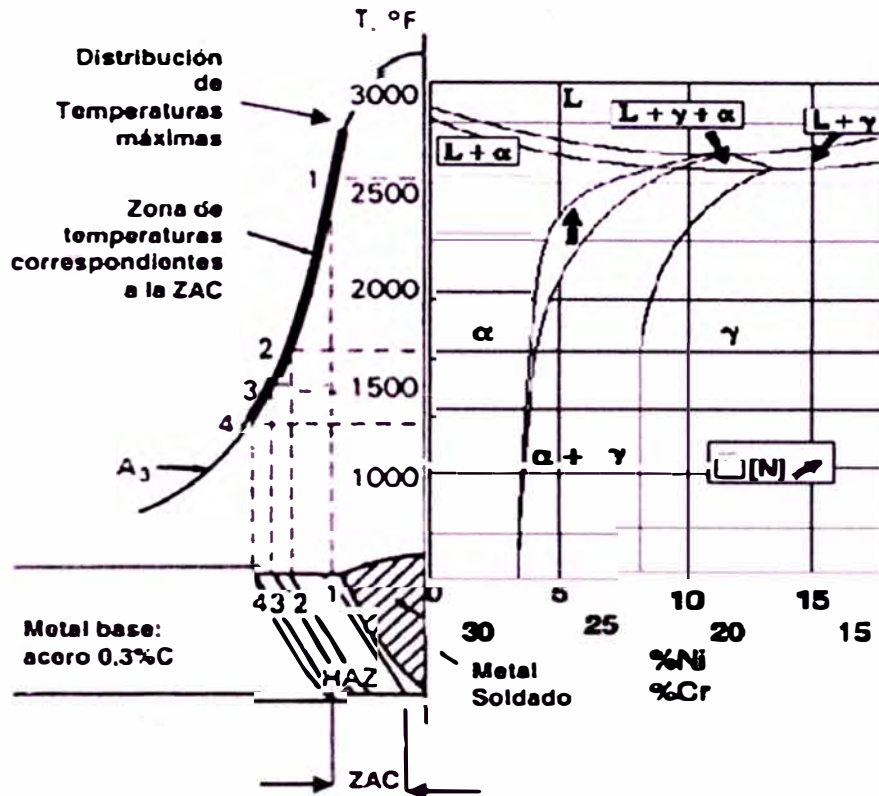


Figura 2.7 Ciclo térmico de soldeo del acero dúplex.

La precipitación de carburos dependerá de lo elevado que sea el contenido de C y de si el metal está o no estabilizado. La fase sigma (σ) se formará entre 550 y 900°C y esto ocurrirá en mayor cantidad y tanto más rápidamente, cuanto más elevado sean los contenidos de Cr, Mo y Nb. En los aceros inoxidables "dúplex" modernos en los que la composición química del material está adecuadamente estudiada y equilibrada, poseen algo de N y su contenido de C es bajo, por lo cual se reducen o eliminan los inconvenientes citados.

La posible fragilización de estos aceros viene determinada por el crecimiento de grano. El calor de soldadura incrementa el contenido de ferrita y el crecimiento de grano es especialmente acentuado en una estructura ferrítica. Cuando se enfría, la

austenita sólo se reforma parcialmente y la zona de soldadura del metal base adquiere una estructura de grano bastante grueso con un contenido en ferrita mayor que antes de realizar el soldeo.

La mayoría de estos aceros se sueldan sin precalentamiento. Cuando sea necesario en espesores gruesos, por ejemplo, su temperatura debe situarse entre 100 y 150°C. La soldadura debe efectuarse siempre con material de aportación, cuya estructura puede ser similar a la del metal base o austenítica. En este último caso la composición, algo más aleada que la del metal base, debe ser tal que, después de su dilución con el metal base, ofrezca un metal de soldadura con 30 a 60% de ferrita.

Si enfriamos rápidamente al material se obtendrá una microestructura de casi en su totalidad de ferrita la cual ocasionara una caída considerable tanto en su resistencia a la corrosión como en sus propiedades mecánicas. Pero si el enfriamiento es lento, entonces, en el material aparecerán fases secundarias como la fase sigma y otras que son muy perjudiciales tanto en la resistencia a la corrosión como en sus propiedades mecánicas. Para evitar esto se debe obtener una microestructura casi homogénea de ferrita y austenita, para esto se debe emplear elementos que permitan la formación de austenita bajo las condiciones post soldadura y que disminuya la tendencia a la formación de fases secundarias.

Algunas técnicas para controlar la microestructura del metal de soldadura seria utilizar un material de aporte que contenga más Ni que el material base y controlando la cantidad de calor que se debe utilizar durante el proceso de soldadura ambas técnicas se explicaran a continuación.

2.5.2.1 Metal de Aporte enriquecido en Níquel.

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

2.5.2.2 Control del aporte termico.

No hay completo acuerdo de parte de los productores e investigadores en soldadura en los límites apropiados de la generación de calor. Los argumentos para una generación de calor grande (ver fórmula), es que da más tiempo para que la ferrita se transforme en austenita, particularmente en la zona afectada por el calor. El peligro de una generación de calor grande es que podría permitir que se formen en la ferrita fases frágiles, tales como la fase sigma. Con los aceros inoxidable dúplex de segunda generación, se necesita un tiempo más largo a temperatura para que se desarrollen estas fases, así que no habrá una fragilización significativa. Un rango de generación de calor generalmente aceptado está entre 0.6 y 2.6 kJ/mm, aunque se han usado niveles tan grandes como 6.0 kJ/mm.

Cuando se deba usar un proceso de soldadura con niveles de generación de calor menores a 0.6 kJ/mm, un precalentamiento a 95 °C – 205 °C es útil para reducir la velocidad de enfriamiento e incrementar el contenido de austenita en la soldadura.

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

La generación de calor en kJ/mm se calcula con la formula (2.4):

$$HI = \frac{V \times I}{v \times 1000} \dots\dots\dots(2.4)$$

Donde:

- HI : Calor de aporte en KJ/mm
- V : Voltaje de soldadura en voltios
- I : Corriente de soldadura en amperios
- v : Velocidad de soldadura en mm/s

2.6 PARTICULARIDADES DEL ACERO DUPLEX S32205.

El acero UNS32205 mas conocido comercialmente como 2205, y también denominado como UNS31803 es de lejos el más utilizado y conocido grado de la familia duplex, representa más del 80% de uso de los aceros inoxidable dúplex, es por esto que se le denomina el caballito de batalla de los dúplex.

Se tiene presente en la aleación de este acero nitrógeno y molibdeno lo cual le da una resistencia a la corrosión en general similar a 904L, pero con resistencia a la fluencia casi el doble que los aceros inoxidable austeníticos.

La alta resistencia mecánica y a la corrosión de estos materiales permite al momento de diseñar reducir el espesor, el peso y consigo el costo a utilizar en los tanques, plataformas, etc. es por ello el interés de fomentar su uso en nuestro país.

2.6.1 Aplicaciones:

- Recipientes a presión, tanques, tuberías e intercambiadores de calor en la industria de procesos químicos.
- Las tuberías, tubos e intercambiadores de calor para el manejo de gas y petróleo.
- Los sistemas de depuración de efluentes.
- Digestores Industriales de Pulpa y Papel, equipos de blanqueamiento.
- Los rotores, ventiladores, ejes y rueda de prensa conjunta que requiere resistencia mecánica y resistencia a la corrosión.
- Los tanques de carga de los buques y camiones.
- Equipamiento para procesamiento de alimentos.
- Plantas de Biocombustibles.

2.6.2 Composición química.

Tabla 2.5 Composición química del acero 2205.

Outokumpu steel name	International steel No		Chemical composition, % by weight Typical values					
	EN	ASTM	C	N	Cr	Ni	Mo	Others
2205	1.4462	S32205*	0.02	0.17	22	5.7	3.1	-

2.6.3 Resistencia Mecánica.

En la tabla 2.6 y 2.7 se dan los valores de resistencia mecánica del material a diferentes temperaturas.

Tabla 2.6 Resistencia mecánica a temperatura ambiente.

Mechanical properties at 20°C

Table 2

	Minimum values, according to EN 10088			Typical values				
	P	H	C	P (15mm)	H (4mm)	C (1mm)		
2205								
Proof strength	R _{0.2}	MPa	460	460	500	510	620	635
Tensile strength	R _m	MPa	640	700	700	750	820	835
Elongation	A ₅	%	25	25	20	35	35	35
Hardness	HB					230	250	250

P = hot rolled plate. H = hot rolled strip. C = cold rolled coil and strip.

* Mechanical properties according to AM 641.

† Refers to A80 for gauges less than 3 mm.

Tabla 2.7 Resistencia mecánica a temperaturas elevadas.

Tensile properties at elevated temperatures. Minimum values according to EN 10028, MPa										
	LDX 2101 ^{••}		2304		LDX 2404 ^{™••}		2205		2507	
	R _{0.2}	R _m	R _{0.2}	R _m	R _{0.2}	R _m	R _{0.2}	R _m	R _{0.2}	R _m
100°C	380	590	330	540	385	615	360	590	450	680
150°C	350	560	300	520	345	590	335	570	420	660
200°C	330	540	280	500	325	575	315	550	400	640
250°C	320	540	265	490	310	560	300	540	380	630

* Values for hot rolled and cold rolled strip according to AM 611

•• Values from internal standard, AM 641

2.6.4 Resistencia al impacto.

La tenacidad de los aceros inoxidables dúplex es intermedio entre los aceros inoxidables ferríticos y los austeníticos. Los aceros inoxidables dúplex presentan una tenacidad aceptable hasta -45° C. El contenido de ferrita es un factor importante pues a medida que aumente la cantidad de este, se reduce la tenacidad en los aceros inoxidables dúplex. Otro factor que reduce la tenacidad es la presencia de fases intermetálicas como la fase sigma o Chi, algunos autores afirman que se pueden aceptar contenidos de 2 a 3% de fase sigma, de igual manera se ven afectadas por ser mantenidos por tiempo prolongado entre las temperaturas de 280 a 450° C lo que se conoce como envejecimiento a bajas

temperaturas. Debido a estos factores se recomienda la restricción de estos aceros al rango de trabajo de -50 a 300°C . En la figura 2.8 y la tabla 2.8 se muestran valores de resistencia al impacto para diferentes temperaturas; además podemos observar que el metal de soldadura con TIG tiene mayor resistencia al impacto.

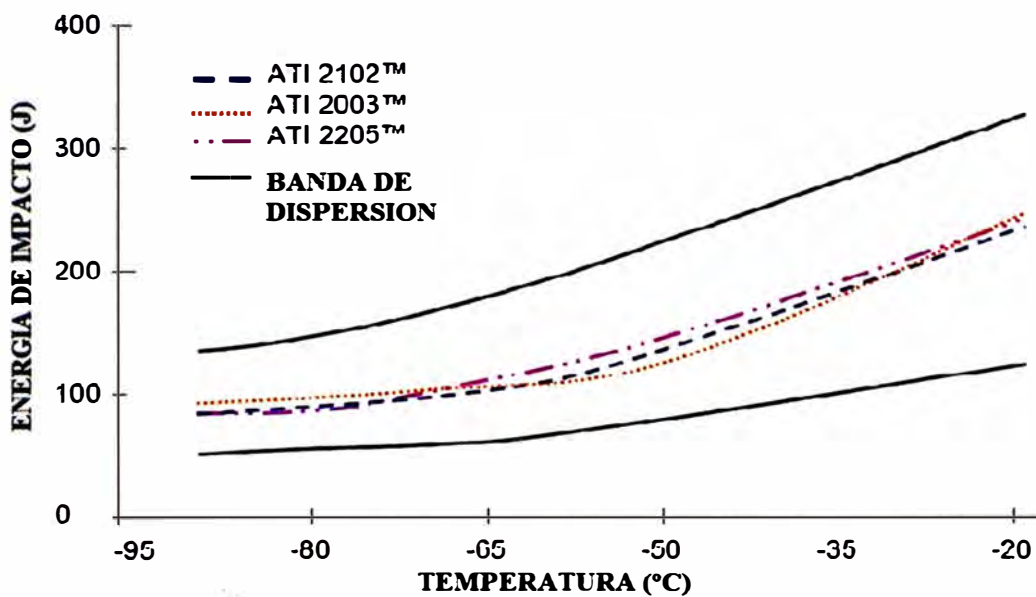


Figura 2.8 Variación de la energía de impacto vs la temperatura.

Tabla 2.8 Resistencia al Impacto del Metal de Soldadura del acero 2205.

Table 10. Charpy-V impact strength of welded joints. Notch in the centre of the weld. Typical values.

Parent metal Sandvik	Filler metal Sandvik	Welding process	Impact strength. J	
			RT	-40°C
SAF 2304	23.7.I.	TIG	213	74
	23.7.I.	SAW ¹⁾	105	17
	23.8.LR	MMA	46	38
SAF 2205	22.8.3.I.	TIG	282	133
	22.8.3.I.	SAW ¹⁾	54	42
	22.8.3.LR	MMA	52	13
	22.9.3.LT	FCAW	55	44
SAF 2507	25.10.4.I.	TIG	110	78
	25.10.4.L	SAW ¹⁾	100	58
	25.10.4.LR	MMA	58	39

¹⁾Using Sandvik 15W flux

2.6.5 Resistencia a la corrosión.

2.6.5.1 Corrosión Generalizada.

Debido a su alto contenido de cromo (22%), molibdeno (3%) y nitrógeno (0,18%); las propiedades de resistencia a la corrosión del acero 2205 son superiores a la de los aceros austeníticos 316L o 317L en la mayoría de los entornos. La figura 2.9 muestra el desempeño del acero 2205 en ácido sulfúrico comparado con otros aceros inoxidable.

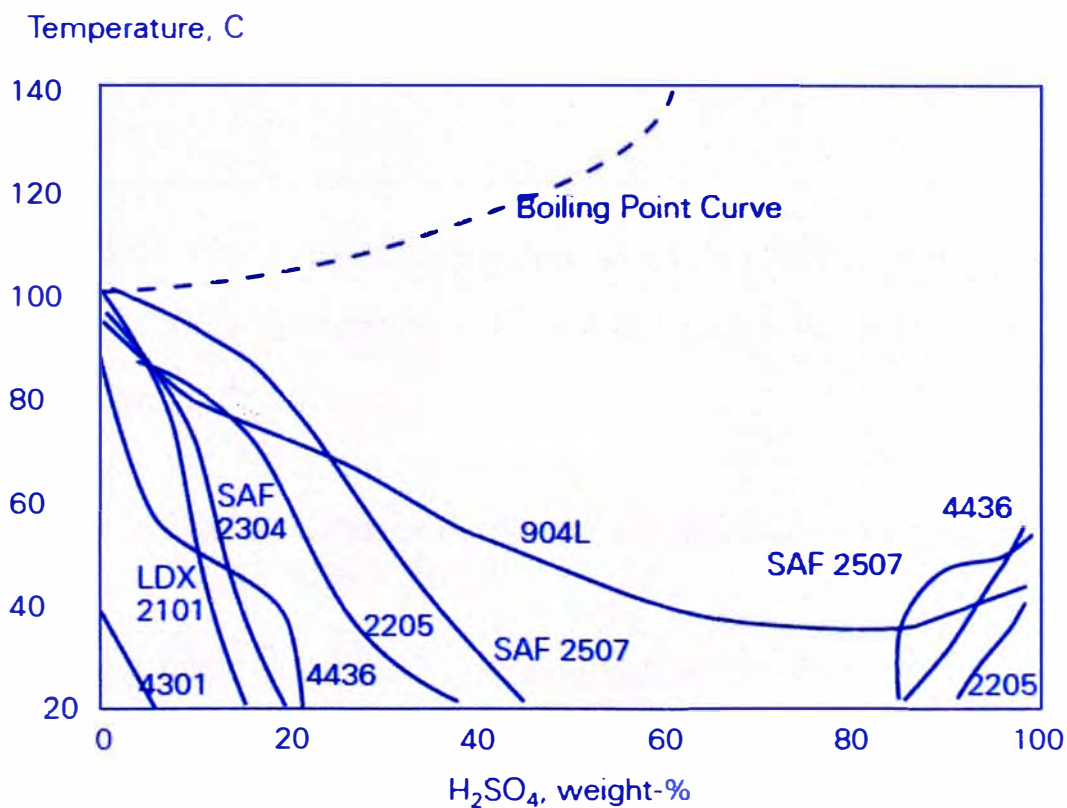


Figura 2.9 Desempeño del 2205 frente al ácido sulfúrico.

En la figura 2.10 se observa similar información que en la figura anterior para ácido clorhídrico. Los ácidos comerciales, normalmente contienen cloruros y otras impurezas que pueden causar corrosión en algunos aceros inoxidables. 2205 ofrece mejores propiedades que los aceros inoxidables austeníticos en cuanto a la resistencia a la corrosión en dichos ambientes.

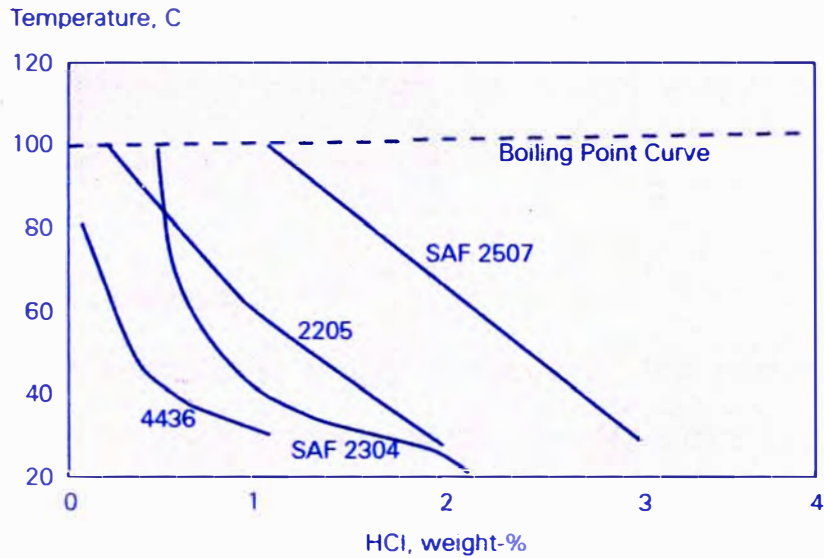


Figura 2.10 Desempeño del 2205 frente al ácido clorhídrico.

2.6.5.2 Corrosión por Picadura.

La exposición a 10% $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ acorde al ensayo ASTM G48 – Método B, determina la máxima temperatura a la cual la picadura no existe (Temperatura Crítica de picadura CPT) dio el siguiente resultado:

Critical Crevice Corrosion Temp (CCCT) in 10% $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

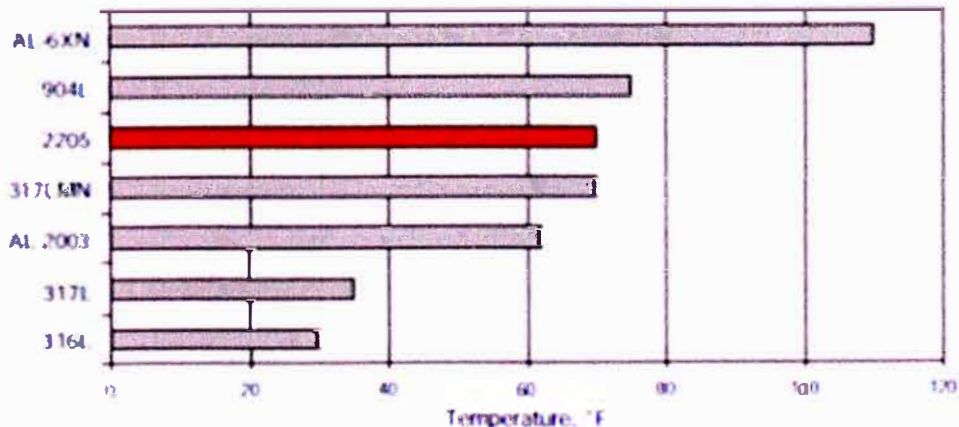


Figura 2.11 Temperatura Crítica de corrosión por picadura según ASTM G48 –B

La combinación de cromo, molibdeno y nitrógeno le da al 2205 una buena resistencia a la corrosión por picaduras en presencia de cloruros. Esta resistencia

es extremadamente importante para los servicios tales como ambientes marinos, de agua salobre, las operaciones de blanqueo, sistemas de agua de circuito cerrado y un poco de aplicación en procesamiento de alimentos.

2.6.5.3 Corrosión Localizada.

La resistencia a la corrosión localizada es frecuentemente evaluada mediante el uso del número PREN (%Cr + 3.3%Mo + 16%N). UNS 32205 está hecho con un mínimo PREN de 34, asegurando una garantía y alta resistencia a la corrosión por picadura y localizada; por lo cual ha estado en servicio en aplicaciones en aguas marinas.

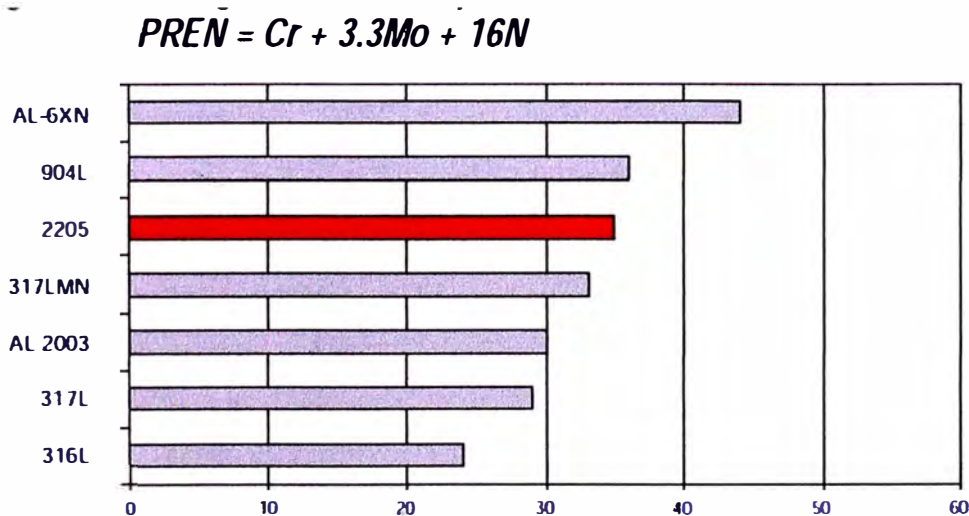


Figura 2.12 Comparación del PREN del acero dúplex 2205 contra otros inoxidable

2.6.5.4 Corrosión bajo Tensión (SCC).

2205 es una aleación económica para muchas aplicaciones donde los aceros inoxidable austeníticos de la serie 300 son susceptibles a la corrosión bajo tensión (SCC) en ambientes clorados. SCC se produce cuando los aceros inoxidable son sometidos a esfuerzos de tracción, mientras están en contacto con soluciones que

contienen cloruros. El incremento de la temperatura también aumenta la susceptibilidad de los aceros inoxidable a la SCC (corrosión bajo tensión).

La resistencia a la corrosión bajo tensión en una solución de cloruro bajo condiciones de evaporación se puede determinar según el método de evaporación de la gota. Esto significa que una solución de sal se deja gotear lentamente en una muestra calentada, mientras que está siendo sometida a esfuerzo de tracción.

Por este método, el valor umbral se determina como el mínimo esfuerzo para la falla después de 500 horas de prueba entre 80-120 ° C. El valor de umbral se expresa generalmente como un porcentaje del Esfuerzo de Fluencia del acero a 200°C. La figura 2.13 muestra los resultados de la prueba; es evidente que los aceros dúplex son superiores a los aceros austeníticos convencionales tal como 304L y 316L.

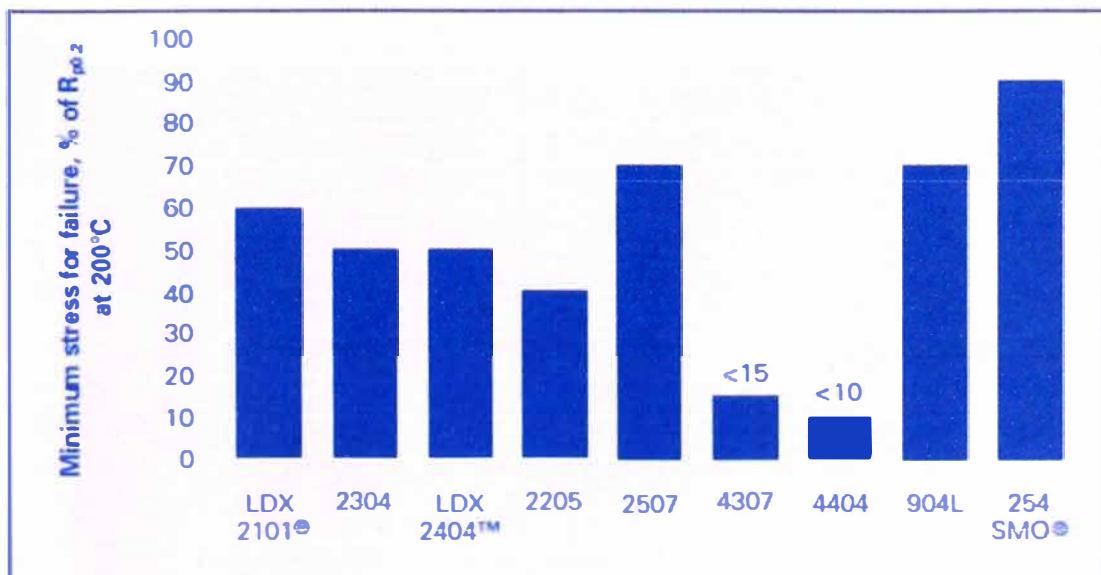


Figura 2.13 Mínimo Esfuerzo de Tracción para la falla por SCC en % del Esfuerzo de Fluencia determinados por el método de evaporación de la gota

CAPITULO III

GENERALIDADES DE TANQUES DE ALMACENAMIENTOS

3.1 CONCEPTOS BASICOS.

Los Tanques de Almacenamiento se usan como depósitos para contener una reserva suficiente de algún producto para su uso posterior y/o su comercialización. También se usan como un pulmón entre la producción y el transporte en los procesos de las plantas industriales absorbiendo las variaciones de consumo del producto almacenado; proporcionando de esta manera flexibilidad operativa. Estos pueden ser atmosféricos o a presión, el presente trabajo estará enfocada a los tanques de almacenamiento Atmosféricos.



Figura 3.1 Tanque de Almacenamiento Atmosférico.

Los tanques de almacenamiento atmosféricos usados para almacenar líquidos son ampliamente utilizados en la industria, principalmente en las refinerías por requerimiento de proceso de almacenamiento temporal de los productos. Debido a su tamaño usualmente son diseñados para contener el líquido a una presión ligeramente mayor que la atmosférica.

Los Tanques de almacenamiento se clasifican en:

3.1.1 Tanque Cilíndrico Horizontal.

Generalmente son de volúmenes relativamente bajos, debido a que presentan problemas por fallas de corte y flexión.



Figura 3.2 Tanque Cilíndrico Horizontal

3.1.2 Tanque Cilíndrico Vertical.

Nos permite almacenar grandes cantidades volumétricas a un costo bajo, con la limitante que solo se pueden usar a presión atmosférica o a presiones internas relativamente pequeña.



Figura 3.3 Tanque cilíndrico vertical fabricado de acero dúplex – España

A su vez estos se pueden dividir en 3:

- De techo fijo.
- De techo flotante
- Sin techo

3.1.2.1 Techo Fijo.- Se emplean para contener productos no volátiles como son el agua, diesel, petróleo crudo, etc. Pueden ser auto soportado o soportado.

3.1.2.2 Techo Flotante.- Se emplea para almacenar productos volátiles como son: alcohol, gasolinas y combustibles en general. Este tipo de techo fue desarrollado para reducir o anular la cámara de aire o espacio libre entre el nivel del líquido y el techo, de tal manera de evitar la formación de gases y consecuentemente la contaminación del ambiente y al mismo tiempo se reducen los riesgos de almacenar productos inflamables.

3.1.2.3 Sin Techo.- Se usa para almacenar productos en los cuales no es importante que este se contamine o que se evapore a la atmosfera tal como es el caso de agua cruda, residual, contra incendios, etc. El diseño de este tipo de tanques requiere de un calculo especial del anillo de coronamiento.

3.2 NORMAS DE DISEÑO Y FABRICACION.

En nuestro País y en muchos otros países de América Latina y el mundo, el diseño y cálculo de tanques de almacenamiento, se basa en la publicación que realiza el "Instituto Americano del Petróleo", al que esta institución designa como "STANDAR A.P.I. 650", para tanques de almacenamiento a presión atmosférica.

El estándar **A.P.I. 650 Welded Tanks for Oil Storage** ELEVENTH EDITION cubre aquellos tanques en los cuales se almacenan fluidos líquidos y están contruidos de acero con el fondo uniformemente soportado por una cama de arena, grava, concreto, asfalto, etc, diseñados para soportar una presión de operación atmosférica o presiones internas que no excedan el peso del techo por unidad de área y últimamente en *el Apéndice X se contempla el uso de los aceros dúplex*. Este Apéndice solo aplica a los Tanques de servicios no refrigerantes con una temperatura máxima de diseño de 260°C y mínima de -40°C.

Este apéndice tiene por objeto ofrecer a la industria petrolera, industria química y otros usuarios; tanques de diseño seguro para la contención de fluidos dentro de los límites de diseño. El espesor mínimo en este apéndice no contiene ninguna previsión por corrosión. En este apéndice se establece sólo los requisitos que difieren de las reglas básicas del estándar API 650. Para los requisitos no establecidos, las normas básicas que se deben seguir.

Este estándar cubre el diseño y cálculo de los elementos constitutivos del tanque, tipos de materiales de fabricación, secuencias en la erección del tanque, recomendación de procedimientos de soldaduras, pruebas e inspecciones, así como lineamientos para su operación.

Para el diseño y cálculo de tanques de almacenamiento, el propietario deberá proporcionar los datos y la información necesaria para llevar a cabo el proyecto. La información mínima requerida son las condiciones de operación tales como: volumen, temperatura, peso específico del líquido, corrosión permisible, velocidad del viento, coeficientes sísmicos de la zona, etc.

El sobre espesor por corrosión que especificará el propietario se incluirá en cuerpo, fondo, techo y estructura, y sólo se agrega al final del cálculo de cada uno de los elementos del tanque, debido a que la agresividad química no es lo mismo para el fluido en estado líquido o gaseoso y en algunos casos hasta para los lodos.

El fabricante tiene la obligación de cumplir con todas las Especificaciones y Normas que marca el Estándar y que acuerde con el propietario, las cuales serán supervisadas y evaluadas por el personal que designe el usuario.

A continuación se describirá brevemente los pasos para el diseño del cuerpo de un Tanque de Almacenamiento con Aceros Inoxidable Dúplex según API 650
APENDICE X.

3.2.1 Diseño del Fondo.

El diseño del fondo de los tanques de almacenamiento depende de las siguientes consideraciones:

Los cimientos usados para soportar el tanque, el método que se utilizará para desalojar el producto almacenado, el grado de sedimentación de sólidos en suspensión, la corrosión del fondo y el tamaño del tanque. Lo que nos conduce al uso de un fondo plano, donde la resistencia permisible del suelo deberá ser por lo menos de 1465 Kg / cm^2 .

Los fondos de tanques de almacenamiento cilíndricos verticales son generalmente fabricados de placas de acero con un espesor menor al usado en el cuerpo. Esto es posible para el fondo, porque se encuentra soportado por una base de concreto, arena o asfalto, los cuales soportarán el peso de la columna del producto.

Teóricamente, una placa delgada de metal de 1.5mm. o menor es capaz de soportar la flexión y la carga de compresión que se genera en la periferia del fondo por el peso del cuerpo que descansa sobre esta sección, pero para prevenir deformaciones al soldar, según el Apéndice X todas las planchas del fondo deben tener un espesor mínimo de 5mm. excluyendo cualquier corrosión permisible especificada por el usuario.

El fondo tendrá que ser de un diámetro mayor que el diámetro exterior del tanque, por lo menos, 100mm. más que el diámetro exterior del tanque. Las placas con las que se habilite el fondo deberán tener un ancho mínimo de 1200mm. Generalmente los fondos se forman con placas traslapadas, esto se hace con el fin de absorber las deformaciones sufridas por el fondo si las placas fueran soldadas al tope.

El espesor de la placa de fondo no debe ser menor al listado en la tabla 3.1 más la corrosión permisible especificada.

Tabla 3.1 Espesor de la plancha del piso según API 650.**Table 5-1a—(SI) Annular Bottom-Plate Thicknesses (t_b)**

Plate Thickness ^a of First Shell Course (mm)	Stress ^b in First Shell Course (MPa)			
	≤ 190	≤ 210	≤ 220	≤ 250
$t \leq 19$	6	6	7	9
$19 < t \leq 25$	6	7	10	11
$25 < t \leq 32$	6	9	12	14
$32 < t \leq 40$	8	11	14	17
$40 < t \leq 45$	9	13	16	19

^aPlate thickness refers to shell plate thickness exclusive of corrosion allowance for product design and thickness as constructed for hydrostatic test design.

^bThe stress to be used is the maximum stress in the first shell course (greater of product or hydrostatic test stress). The stress may be determined using the required thickness divided by the thickness from "a" then multiplied by the applicable allowable stress:

Product Stress = $(t_d / \text{as-constructed } t \text{ exclusive of } CA) (S_d)$

Hydrostatic Test Stress = $(t_r / \text{as-constructed } t) (S_r)$

Note: The thicknesses specified in the table, as well as the width specified in 5.5.2, are based on the foundation providing uniform support under the full width of the annular plate. Unless the foundation is properly compacted, particularly at the inside of a concrete ringwall, settlement will produce additional stresses in the annular plate.

Los espesores especificados en la tabla son los indicados y están basados en una cimentación que proporcione un soporte uniforme debajo de toda la placa del piso. La cimentación debe estar bien compactada para evitar esfuerzos adicionales.

3.2.2 Diseño del Cuerpo.

El espesor de la pared del cuerpo requerido para resistir la carga hidrostática será mayor que el calculado por condiciones de diseño o por condiciones de prueba hidrostática, pero en ningún caso será menor a lo que se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Espesores mínimos del cuerpo del tanque según API 650.

Nominal Tank Diameter		Nominal Plate Thickness	
(m)	(ft)	(mm)	(in.)
< 15	< 50	5	³ / ₁₆
15 to < 36	50 to < 120	6	¹ / ₄
36 to 60	120 to 200	8	⁵ / ₁₆
> 60	> 200	10	³ / ₈

El espesor de la pared por condición de diseño, se calcula con base al nivel del líquido, tomando la densidad relativa del fluido establecido por el usuario. El espesor por condiciones de prueba hidrostática se obtiene considerando el mismo nivel de diseño, pero ahora utilizando la densidad relativa del agua.

Cuando sea posible, el tanque podrá ser llenado con agua para la prueba hidrostática, pero si esto no es posible y el cálculo del espesor por condiciones de prueba hidrostática es mayor que el calculado por condiciones de diseño, deberá usarse el obtenido por condiciones de prueba hidrostática. El esfuerzo calculado de la carga hidrostática para cada anillo no deberá ser mayor que el permitido por el material y su espesor no será menor que el de los anillos subsecuentes.

Para el cálculo del espesor de pared del cuerpo cilíndrico del tanque el Estándar API 650 Apéndice X recomienda usar el método de 1 pie. Con el método de 1 pie se calcula el espesor requerido de la pared del tanque, por condiciones de diseño y de prueba hidrostática, considerando una sección transversal ubicada a 304.8 mm. (1 pie) por debajo de la unión de cada anillo.

Este método sólo es aplicable en tanques con un diámetro igual o menor a 60.96mts. (200pies). Los espesores mínimos requeridos de la plancha para el cuerpo del tanque serán mayores que los calculados con las formulas 3.1 y 3.2 según API 650 – Apéndice X.

$$t_d = \frac{[4.9 \times D(H - 0.3) \times G]}{S_d \times E} + CA \dots \dots \dots (3.1)$$

$$t_t = \frac{[4.9 \times D(H - 0.3)]}{S_t \times E} + CA \dots \dots \dots (3.2)$$

Dónde:

t_d : Espesores por condiciones de diseño (mm).

t_t : Espesor por prueba hidrostática (mm).

D: Diámetro nominal del tanque (m)*.

*(El diámetro nominal del tanque se mide en la fibra media del cuerpo)

H: Altura de diseño del nivel del líquido (m).

(Altura desde la parte de baja del anillo considerado al perfil de coronamiento, o cualquier nivel indicado por el usuario, restringido por techos flotantes o cálculos por sismo.)

G: Densidad relativa del líquido a almacenar o del agua para cálculo por prueba hidrostática.

CA: Corrosión permisible (mm.).

S_d : Esfuerzo permisible por condiciones de diseño (Kg / cm²).

S_t : Esfuerzo permisible por condiciones de prueba hidrostática (Kg / cm²).

E: Eficiencia de la junta de soldadura. Ver tabla 3.3.

Tabla 3.3 Eficiencia de la junta de soldadura según API 650 Apéndice X

Table X-3—Joint Efficiencies	
Joint Efficiency	Radiographic Requirements
1	Radiograph per 8.1.2
0.85	Radiograph per X.4.14.1.1
0.7	No radiography required

El esfuerzo máximo permisible de diseño (S_d) y de prueba hidrostática (S_t), se muestra en la tabla 3.4, recomendado por el estándar API 650 Apéndice X para el diseño de tanques de almacenamiento con aceros duplex.

Tabla 3.4 Esfuerzos permisibles para aceros dúplex para diferentes temperaturas de diseño según API 650 Apéndice X.

Table X-2a—(SI) Allowable Stresses for Tank Shells

Alloy	Min Yld MPa	Min Ten MPa	Allowable Stress MPa for Design Temp Not Exceeding (S_d)					S_d ambient
			40°C	90°C	150°C	200°C	260°C	
S31803	450	620	248	248	239	230	225	266
S32003	450	655	262	231	218	215	212	281
S32101	450	650	260	234	223	215	212	278
S32205	450	655	262	234	225	208	198	281
S32304	400	600	240	229	213	205	200	257
S32550	550	760	303	302	285	279	272	325
S32520	550	770	308	270	265	256	251	331
S32750	550	795	318	319	298	279	268	343
S32760	550	750	298	314	259	256	256	319

Notes:

1. S_d may be interpolated between temperatures.
2. The design stress shall be the lesser of $2/5$ of the minimum tensile strength or $2/3$ of the minimum yield strength.
3. The hydrotest stress shall be the lesser of $3/7$ of the minimum tensile strength or $3/4$ of the minimum yield strength.
4. For dual certified materials, S31803/S32205 and S32550/S32520, use the allowable stress of the grade specified by the Purchaser.

3.2.3 Diseño del Techo.

Los techos pueden clasificarse: de techos fijos, de techos flotantes y sin techo. Dentro de los techos fijos tenemos tres tipos: cónicos, de domo y de sombrilla, los cuales pueden ser auto soportados o soportados por estructura (para el caso de techos cónicos de tanques de gran diámetro).

Los techos auto soportados ya sean tipo cónico, domo, o sombrilla, tiene la característica de estar apoyados únicamente en su periferia, calculados y diseñados para que su forma geométrica, en combinación con el espesor mínimo requerido, absorban la carga generada por su propio peso más las cargas vivas, a

diferencia de los techos soportados que contarán con una estructura que admita dichas cargas. El techo cónico es una cubierta con la forma y superficie de un cono recto. El tipo domo es un casquete esférico, y el de tipo sombrilla, es un polígono regular curvado por el eje vertical.

Independientemente de la forma o el método de soporte, los techos son diseñados para soportar una carga viva de por lo menos, 1.76 Kg / cm²; más la carga muerta ocasionada por el mismo. ***Las planchas del techo tendrán un espesor mínimo nominal de 5mm (3/16")***.

Como el objetivo principal del presente trabajo no esta enfocado en el diseño de tanques no se esta presentando los métodos para el diseño estructural de los distintos tipos de techos para mayor información al respecto se recomienda revisar el ESTÁNDAR API 650 CAP. 3.10.

3.3 NORMA DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA.

El código API 650, titulado **Welded Tanks for Oil Storage**, en su onceava edición; contiene los lineamientos para el diseño, fabricación, montaje y requerimientos de prueba de tanques de almacenamiento de presión interna aproximadamente igual a la atmosférica (presión interna menor al peso de las planchas del techo).

El presente estudio propone la utilización de plancha de acero inoxidable Dúplex conforme a ASTM A240 tipo S32205 para la construcción de un tanque de almacenamiento según API 650.

En el Apéndice X, específicamente en la sección X.4.12.1, API 650 establece que la Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS), deberá ser calificado en concordancia con las prácticas descritas en la sección IX del código ASME y

además deberá cumplir con los requisitos de la Norma ASTM A923 Método B y cuando el comprador lo especifique también el Método C.

Asimismo el código ASME, SECCION IX reconoce el acero inoxidable Dúplex 2205 con UNS S32205 y le designa como ASME S-10H, GP 1 (Tabla 3.5) por lo cual es apropiado para ser utilizado.

Tabla 3.5 Numero S del Acero Dúplex UNS 32205 según ASME IX.

QW/QB-422 FERROUS/NONFERROUS P-NUMBERS AND S-NUMBERS (CONT'D)
Grouping of Base Metals for Qualification

Spec. No.	Type or Grade	UNS No.	Minimum Specified Tensile, ksi (MPa)	Ferrous (CONT'D)						Nominal Composition	Product Form
				Welding				Brazing			
				P-No.	Group No.	S-No.	Group No.	P-No.	S-No.		
SA-240	S44635	S44635	90 (620)	10I	1	...	...	102	...	25Cr-4Ni-4Mo-Ti	Plate, sheet, & strip
SA-240	S44660	S44660	85 (585)	10K	1	...	...	102	...	26Cr-3Ni-3Mo	Plate, sheet, & strip
SA-240	S44700	S44700	80 (550)	10J	1	...	...	102	...	29Cr-4Mo	Plate, sheet, & strip
SA-240	S44800	S44800	80 (550)	10K	1	...	...	102	...	29Cr-4Mo-2Ni	Plate, sheet, & strip
A 240	S32205	S32205	90 (620)	...	...	10H	1	...	102	22Cr-5Ni-3Mo-N	Plate, sheet, & strip
A 240	S34565	S34565	115 (795)	...	...	8	4	...	...	24Cr-17Ni-6Mn-4.5Mo-N	Plate, sheet, & strip
SA-249	TP201	S20100	95 (655)	8	3	...	...	102	...	17Cr-4Ni-6Mn	Welded tube
SA-249	TP202	S20200	90 (620)	8	3	...	...	102	...	18Cr-5Ni-9Mn	Welded tube
SA-249	TPXM-19	S20910	100 (690)	8	3	...	...	102	...	22Cr-13Ni-5Mn	Welded tube
SA-249	TPXM-29	S24000	100 (690)	8	3	...	...	102	...	18Cr-3Ni-12Mn	Welded tube
SA-249	TP304	S30400	75 (515)	8	1	...	...	102	...	18Cr-8Ni	Welded tube
SA-249	TP304L	S30403	70 (485)	8	1	...	...	102	...	18Cr-8Ni	Welded tube
SA-249	TP304H	S30409	75 (515)	8	1	...	...	102	...	18Cr-8Ni	Welded tube
SA-249	TP304N	S30451	80 (550)	8	1	...	...	102	...	18Cr-8Ni-N	Welded tube
SA-249	TP304LN	S30453	75 (515)	8	1	...	...	102	...	18Cr-8Ni-N	Welded tube
SA-249	S30815	S30815	87 (600)	8	2	...	...	102	...	21Cr-11Ni-N	Welded tube
SA-249	TP309S	S30908	75 (515)	8	2	...	...	102	...	23Cr-12Ni	Welded tube
SA-249	TP309H	S30909	75 (515)	8	2	...	...	102	...	23Cr-12Ni	Welded tube
SA-249	TP309Cb	S30940	75 (515)	8	2	...	...	102	...	23Cr-12Ni-Cb	Welded tube
SA-249	TP309HCb	S30941	75 (515)	8	2	...	...	102	...	23Cr-12Ni-Cb	Welded tube

83

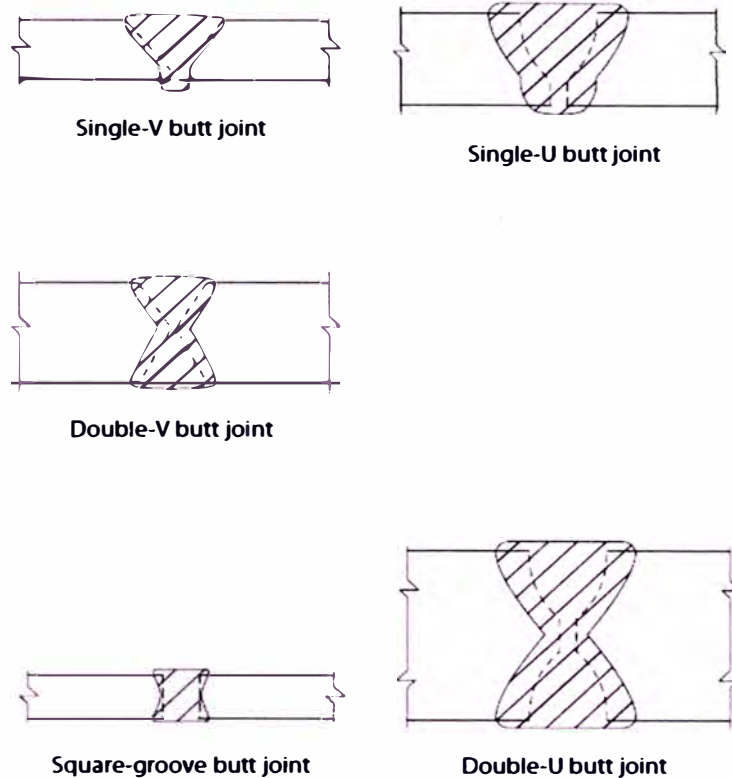
Los registros de calificación de procedimientos de soldadura deberán documentar los resultados de las pruebas exigidas tanto por ASME Sección 9 y ASTM A923. La norma ASTM A923 es utilizada para la detección de fases intermetálicas en aceros inoxidables Dúplex Austeno/Ferríticos, y es la tendencia en la industria el calificar procedimientos de soldadura en aceros inoxidables duplex con los requerimientos de esta norma.

3.4 RECOMENDACIONES PARA EL SOLDEO.

Uno de los factores determinantes para el proceso de soldadura son las dilataciones térmicas porque, al soldar las placas de acero del fondo, cuerpo y techo, se presentan deformaciones, debido a que el incremento de temperatura es del orden de 2204°C a 13870°C (4,000°F a 2,500°F) dependiendo del proceso que se utilice. Por eso se debe usar un procedimiento de soldadura que permita evitar las deformaciones, recomendando que la secuencia de soldado para el piso se inicie en el centro del tanque y avance hacia la periferia del fondo, soldando juntas longitudinales dejando pendientes las soldaduras transversales las que serán soldadas cuando se haya avanzando en las soldaduras del primer anillo del casco. Las pequeñas deformaciones que se permitan en el primer anillo deben ser las mínimas, de lo contrario, se reflejarán en los últimos anillos, pero amplificando más o menos diez veces, por lo que las soldaduras verticales del casco deben ser alternadas y por el procedimiento del paso del peregrino para obtener una verticalidad y circularidad aceptable.

3.4.1 Juntas Verticales del Cuerpo.

Las juntas verticales deberán ser de penetración y fusión completa, lo cual se podrá lograr con soldadura doble, de tal forma que se obtenga la misma calidad del metal depositado en el interior y el exterior de las partes (ver figura 3.4). Las juntas verticales no deberán ser colineales, pero deben ser paralelas entre sí, en una distancia mínima de 5 veces el espesor de la placa (5t).



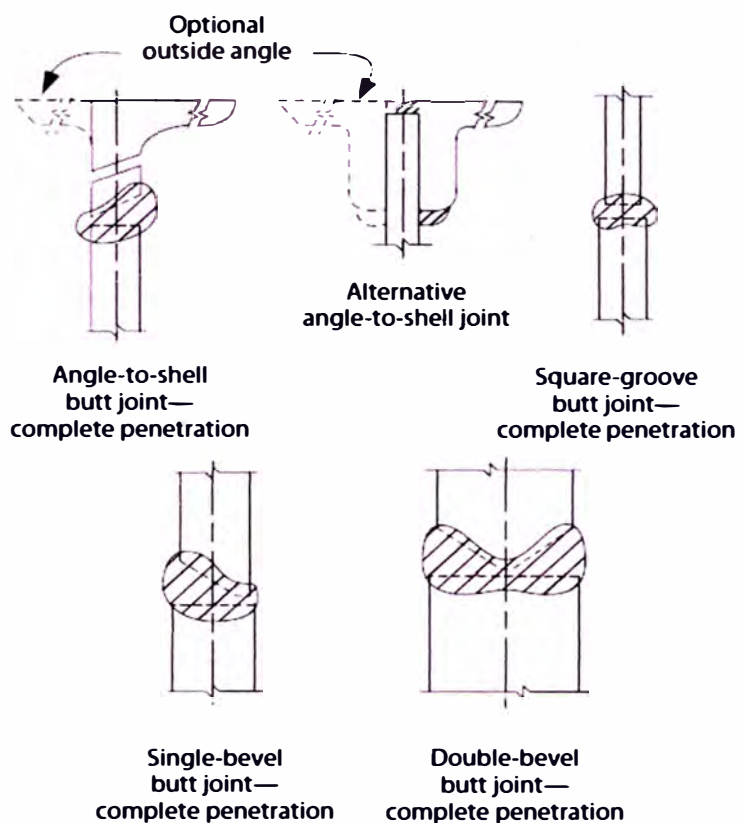
Note: See 5.1.5.2 for specific requirements for vertical shell joints.

Figura 3.4 Las juntas verticales típicas; en todos los casos de penetración total.

3.4.2 Juntas Horizontales del cuerpo.

Las juntas horizontales, deberán ser de penetración y fusión completa, excepto la que se realiza entre el ángulo de coronamiento y el cuerpo, la cual puede ser unida por doble soldadura a traslape, cumplimiento con el procedimiento de soldadura.

A menos que otra cosa sea especificada, la junta a tope con o sin bisel entre los anillos del cuerpo, deberán tener una línea de centros o fibra media común tal como se muestra en la figura 3.5.



Note: See 5.1.5.3 for specific requirements for horizontal shell joints.

Figura 3.5 Juntas Horizontales típicas para el cuerpo del tanque.

3.4.3 Juntas del Piso.

Para la unión de las planchas del piso se tiene 2 casos diferentes por lo cual cada una de estas se tratara independientemente.

3.4.3.1 Juntas a Traslape:

Las placas del fondo deberán ser rectangulares y estar escuadradas. El traslape tendrá un ancho de por lo menos 32mm para todas las juntas. Las uniones de dos o tres placas que estén soldadas, guardarán una distancia mínima de 305mm con respecto a cualquier otra junta y/o a la pared del tanque.

Las placas del fondo serán soldadas con un filete continuo a lo largo de toda la unión. A menos que se use un anillo anular, las planchas del fondo llevarán

bayonetas para un mejor asiento de la plancha del cuerpo que son apoyadas sobre el piso de acuerdo a la Figura 3.6.

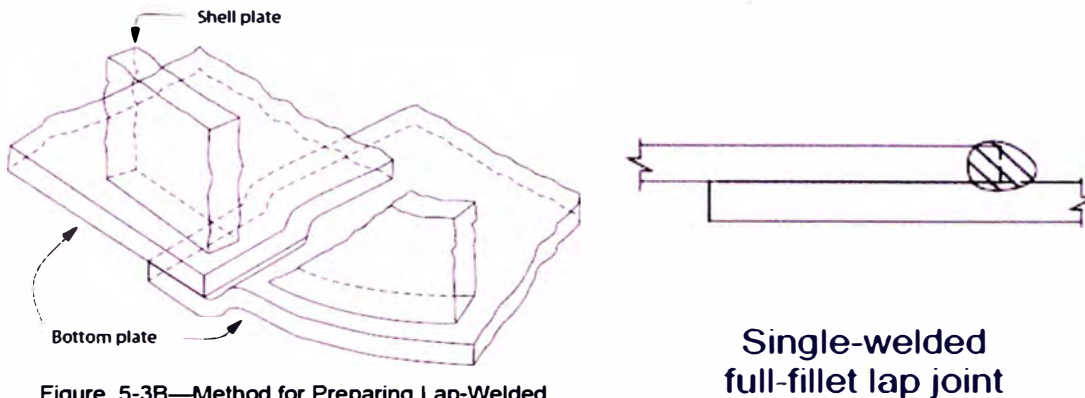
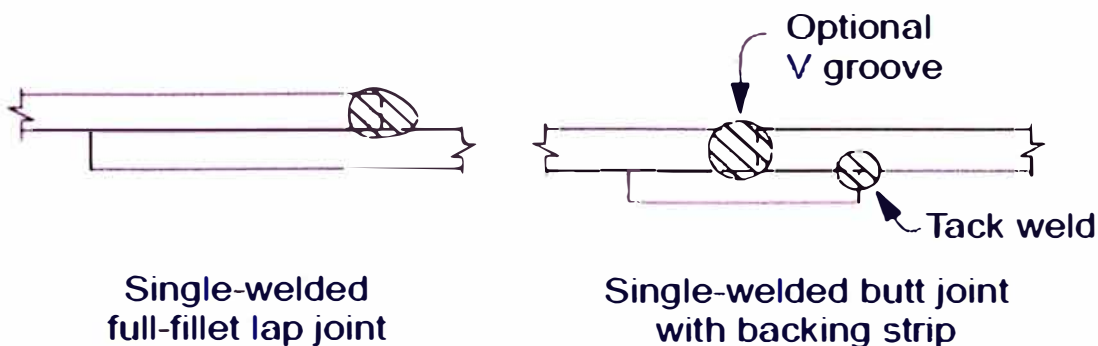


Figure 5-3B—Method for Preparing Lap-Welded Bottom Plates under Tank Shell (See 5.1.5.4)

FIGURA 3.6 Métodos de preparación de la junta a traslape

3.4.3.2 Juntas a Tope:

Las placas del fondo deberán tener sus bordes preparados para aplicar el cordón de soldadura, ya sea rectas o con biselés en "V". Si se utilizan bordes rectos la abertura de raíz no deberá ser menor a 6.3 mm (1/4"). Las placas del fondo deberán tener punteada una platina de respaldo de por lo menos 3.2 mm. (1/8") de espesor, ver figura 3.7.



BOTTOM-PLATE JOINTS

Figura 3.7 Tipos de juntas para planchas del piso.

3.4.4 Juntas entre Cuerpo y Piso.

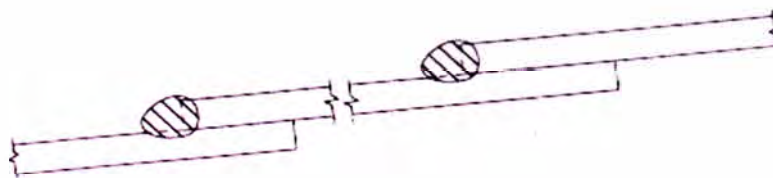
Para planchas de pisos con espesor nominal menor o igual de 13mm (1/2"); las juntas entre planchas de fondo y del cuerpo tendrá que ser hecha con un cordón de soldadura de filete continuo. El tamaño del cordón de soldadura no debe ser mayor que 12.7mm. (1/2") y no menor que el espesor nominal de la plancha mas delgada; o menor que los valores mostrados en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Tamaño mínimo de la soldadura de Filete.

Nominal Thickness of Shell Plate		Minimum Size of Fillet Weld	
(mm)	(in.)	(mm)	(in.)
5	0.1875	5	$\frac{3}{16}$
> 5 to 20	> 0.1875 to 0.75	6	$\frac{1}{4}$
> 20 to 32	> 0.75 to 1.25	8	$\frac{5}{16}$
> 32 to 45	> 1.25 to 1.75	10	$\frac{3}{8}$

3.4.5 Juntas entre Techo y Perfil de Coronamiento.

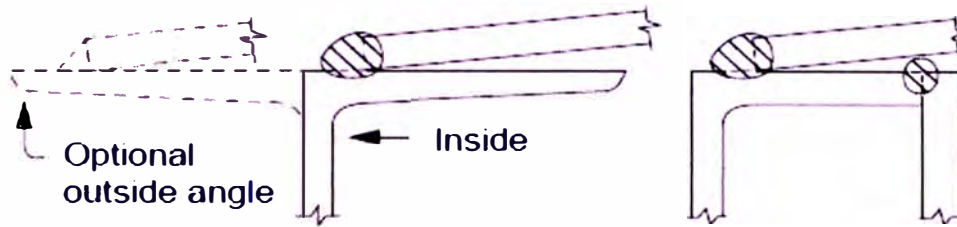
Las placas del techo deberán soldarse a traslape por el lado superior con un filete continuo igual al espesor de las mismas (Ver Figura 3.8).



ROOF-PLATE JOINT

Figura 3.8 Junta a traslape entre las planchas del techo

Las placas del techo serán soldadas al perfil de coronamiento del tanque con un filete continuo por el lado superior únicamente y el tamaño del filete será igual al espesor más delgado (Ver Figura 3.9).



ROOF-TO-SHELL JOINTS

Figura 3.9 Juntas típicas para perfil de coronamiento

Las secciones que conformen el perfil de coronamiento para techos auto soportados estarán unidas por cordones de soldadura que tengan penetración y fusión completa.

CAPITULO IV

ELABORACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)

A continuación se hará un breve análisis para la selección de los parámetros de soldeo de nuestro WPS para la fabricación de un tanque almacenamiento a presión atmosférica, según plano No 1 mostrado en ANEXOS, partiendo de la premisa que este se elaborara mediante la norma **ASME Sección IX** tal como se explicó en el capítulo II.

4.1 PROCESO DE SOLDADURA A EMPLEAR.

Para soldar los aceros inoxidable dúplex se pueden utilizar todos los procesos de soldadura convencionales como: SMAW, GMAW, GTAW, SAW, FCAW, Plasma y Láser. La elección del proceso de soldadura esta normalmente determinado por las propiedades requeridas, la soldabilidad posicional, la productividad y disponibilidad del metal de aporte.

A continuación se hará una breve descripción de los métodos más empleados para soldadura manual en posición vertical ascendente:

4.1.1 SMAW:

Particularmente idónea para toda posición, existe una gama muy amplia de electrodos revestidos para aceros dúplex. Para todos los productos los mejores resultados se consiguen con CCEP. Se recomienda arco corto para mayor estabilidad del arco, evitar la formación de poros y oxidación de la superficie. Se puede aplicar como pase de raíz, relleno y acabado.

4.1.2 GMAW:

Normalmente se utiliza con un arco spray pulsado; debido a que el baño de fusión es relativamente grande y un poco dificultoso la soldadura manual en posición. Por lo tanto para soldadura en posición es recomendable usar una transferencia en gotas con arco pulsado. Se puede emplear como pase de raíz con backing cerámico; los gases mas empleados se muestra en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Gases de protección mas empleados en GMAW.

Método	Calidades	Gases de protección
MIG	LDX 2101, 2304, 2205	1. Ar+30%He+1-3%CO ₂ 2. Ar+1-2%O ₂ o Ar+2-3%CO ₂
	2507/P100	1. Ar+30%He+1-3%CO ₂ 2. Ar 3. Ar+30%He+1-2%N ₂ +1-2%CO ₂

4.1.3 GTAW:

Normalmente se utiliza para piezas de poco espesor, ideales para pases de raíz en las cuales no se tenga acceso a la pieza por el otro lado de la junta (tuberías), los pases posteriores se pueden aplicar con otro proceso de mayor deposición de metal de aporte; los gases mas empleados se muestra en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Gases de Protección mas empleados en GTAW.

TIG	LDX 2101, 2304, 2205, 2507/P100	1. Ar+2%N ₂ +10-30%He 2. Ar
-----	------------------------------------	---

4.1.4 Justificación de la Selección del Proceso de Soldadura.

Para la selección del proceso de soldadura, un factor determinante es la disponibilidad de los metales de aporte existente en nuestro mercado, pues se

consultó a los principales proveedores de estos, de los cuales solo uno tiene estos productos y además esta empresa solo tiene electrodos revestidos.

De acuerdo a la revisión de la literatura se observó que la resistencia mecánica y a la corrosión de estos aceros se ve menos afectada empleando un pase de raíz con proceso GTAW + pasadas de relleno y acabado con proceso SMAW. Pero en vista que actualmente en nuestro mercado no se encuentra metal de aporte para GTAW el presente trabajo se realizara empleando solo con proceso SMAW.

4.2 ELECCION DEL METAL DE APORTE.

Queda claro que una de las primeras tareas para asegurar una unión en soldadura eficiente es la selección de un material de aporte adecuado. Esta selección deberá asegurar las características de continuidad metalúrgica y mecánica durante la realización del proceso de soldadura y una vez puesto en funcionamiento el componente.

4.2.1 Identificación de Metales de Aporte.

En la actualidad existen una variedad de materiales de aportes que se pueden usar para soldar aceros inoxidable. A continuación en las tablas 4.3, 4.4 y 4.5 se muestran una clasificación de acuerdo a los distintos proveedores del mercado nacional y en la tabla 4.6 se muestra una comparación desde el punto de vista de composición química.

Tabla 4.3. Características de materiales de aporte – SOLDEXA.

Item	Nombre	Descripción	Aplicaciones
1	INOX AW	Electrodo inoxidable del tipo rutilico con bajo % Ferrita, material depositado de estructura Austeno-ferritica.	Para soldar Inoxidable AISI 301, 302, 308, 301L, 302L, 304L, 308L. Recuperación de paletas y rodetes de turbinas.
2	INOX AW+CB	Electrodo inoxidable austenitico, la adición de Cb evita la perdida de cromo en la unión.	Para soldar aceros AISI 312, 347. Para soldar aceros donde es necesario reducir la corrosión intergranular.
3	INOX BW ELC	Electrodo inoxidable del tipo austeno-ferritico de bajo % C. Revestimiento rutilico	Para soldar AISI 316L, 317L, 318L. Para fabricar recipientes, ductos o tuberías expuestas a ataques químicos.
4	CITORIEL 801	Electrodo inoxidable 100% austenitico. El contenido de Mn mejora la resistencia al desgaste (auto endurecimiento).	Usado para recargue. Para recuperación de piezas que sufren desgaste.
5	INOX 309 ELC	Electrodo inoxidable de tipo rutilico de estructura austeno-ferritica. Excelentes propiedades de auto endurecimiento.	Para soldar aceros AISI 309L. Para fabricación de tuberías de conducción de fluidos corrosivos.
6	EXSA 109S	Electrodo inoxidable sintético de alto rendimiento (160%).	Recomendado para plaquetado con planchas antiabrasivas de tolva de camiones.
7	INOX 29/9	Electrodo inoxidable de tipo rutilico con estructura austeno-ferritica. Con ferrita mayor al 20 %.	Para herramientas inoxidables. Para piezas de alta resistencia.
8	EXSA 106	Electrodo austenitico-ferritico. Con ferrita mayor a 30%.	Para unión y recargue en aceros de mediano y alto carbono. Recomendado para uniones de alta responsabilidad.
9	INOX CW	Electrodo inoxidable 100% austenitico de gran resistencia al calor. Fácilmente maquinable.	Para soldar aceros AISI 310. Para reparación de matrices, piezas de hornos, equipos mineros, etc.
10	CITOCHROM 134	Electrodo tipo básico de estructura martensitica.	Para la reconstrucción de accesorios de turbinas pelton. Para recuperación de piezas que han sufrido desgaste por corrosión.
11	EXSA 127	Electrodo de máxima resistencia al ataque químico. Con extra bajo contenido de carbono.	Soporta ataques de agua de mar.
12	EXSA 511	Electrodo de níquel. El metal depositado es libre de poros y resistente a químicos.	Para soldadura monel, aceros disímiles y plaquetado de aceros.
13	EXSA 512	Electrodo de níquel desarrollado para la industria naval, plantas desalinizadoras, etc.	Para recargue de aleaciones similares de cupro-níquel, con contenido de hasta 30 % de níquel.
14	EXSA 521	Electrodo de níquel de alto rendimiento para recargue de aceros.	Para fabricación de recipientes a presión, calderas, armaduras, maquinas y aparatos.
15	EXSA 524	Electrodo de níquel resistente a la acción de agua de mar y medios ácidos y alcalinos.	Para unir y recubrir aceros resistentes a la temperatura.
16	EXSA 717H	Electrodo de níquel utilizado para recargue, impacto severo, etc.	Para matrices de estampado en caliente, bombas, y válvulas.
17	EXSA 2209	Electrodo especial para acero inoxidable dúplex buena resistencia a la corrosión bajo tensión y por picaduras.	Para aceros inoxidables dúplex 2205 y 2304.

Tabla 4.4 Características de materiales de aporte – INDURA.

Item		Nombre	Descripción	Aplicaciones
17	INDURA	INDURA 308	Electrodo altamente resistente contra la fragilidad por fase sigma. Facil remoción de escoria.	Para aceros AISI 301, 302, 304 y 304. Para aceros inoxidables donde la temperatura de servicio es inferior a 750 °C.
18		INDURA 308 L	Electrodo de revestimiento rutilico. Excelente protección contra la corrosión intergranular.	Para aceros AISI 304, 304L, 308, 308L, 321, 347, 348.
19		INDURA 309 L	Electrodo que previene la precipitación de carburos de cromo.	Para aceros AISI 309, 309L, 309Cb, 304, 304L, 347.
20		INDURA 309Mo L	Electrodo de revestimiento rutilico.	Para unión de metales disimiles. Para unión de aceros AISI 309 MoL y reparación de aceros tipo 316 y 316L.
21		INDURA 25-20	Electrodo de revestimiento rutilico. Se puede usar de forma intermitente.	Para rellenos de ejes. Para aceros 310, 314, 310Cb. Componentes sometidos a temperaturas.
22		INDURA 29-9S	Electrodo de revestimiento rutilico. Su escoria se desprende fácilmente.	Reparación de ejes y engranajes. Rellenos de aceros templables. Para aceros AISI 312, 314, 303.
23		INDURA 316	Electrodo rutilico. Proporciona mayor resistencia al creep.	Para equipos químicos y petroquímicos.
24		INDURA 316 L	Electrodo austenítico con extra bajo contenido de carbono. Excelente protección contra corrosión intergranular.	Para aceros AISI 316, 316L, 317, 317L, 316Ti y 318.
25		INDURA 347	Electrodo de revestimiento rutilico. El Nb inhibe la precipitación de carburos.	Para aceros AISI 347, 321, 304 y 308L.
26		INDURA 13/4	Electrodo que proporciona mayor resistencia al agrietamiento de bajo hidrogeno.	Para aceros AISI 403, 405, 410, 410S, 414, 416 y 420. Muy apropiado para ruedas de turbinas.
27		INDURA 2209	Electrodo de estructura tipo dúplex. Alta resistencia a la tracción y a la corrosión bajo tensión y por picadura.	Para aceros 2205, 2304.

Tabla 4.5 Características de materiales de aporte – LINCOLN.

Item		Nombre	Descripción	Aplicaciones
28	LINCOLN	JUNGO 4462	Electrodo Básico. Gran resistencia a la corrosión en general.	Para aceros duplex.
29		AROSTA 4462	Electrodo rutilico. Gran resistencia a la corrosión en general.	Para aceros duplex.
30		ZERON 100X	Electrodo básico de estructura austeno-ferrítica. Elevada resistencia a la corrosión por picaduras y grietas.	Para aceros 2205, Zeron100 (S32760).

Tabla 4.6 Composición química para materiales de aporte.

Item	Nombre	Designación		Composición Química (%)														PREN	Prop. Mecánicas		
		AWS	DEN	Cr	Ni	Mo	W	Cu	N	Si	C	Mn	P	S	Fe	Co	Nb		R. Tracc. (Mpa)	Elong. (%)	
1	SOLDEXA	INOX AW	E 308L-16	E 199L R23	19	9					0.4	0.03	1						19	550	35
2		INOX AW-CB	E 347-16	E 199NbR26	19	9					0.7	0.06	0.8				0.4		19	550	35
3		INOX BW ELC	E 316L-16	E 19123 L R23	17	12	3				0.7	0.03	0.8						25	560	30
4		CITORIEL 801	E 307-16	E 188MrR26	19.7	9.5	0.5				0.4	0.08	1.7						21	510	
5		INOX 309 ELC	E 309L-16	E 2312L R23	22	12	0.75				0.9	0.04	1.2						24	570	30
6		EXSA 109S	E 309 Mo-26	E 23123 MPR36 160	22	12	2.8				0.8	0.04	1						31	600	30
7		INOX 29 9	E 312-16	E 299R23	29	10	0.5				1.1	0.10	1						31	740	25
8		EXSA 106	E 312-16	E 299R23	29	9					0.9	0.10	0.6						29	736	20
9		INOX CW	E 310-16	E 2520R26	25	20					0.5	0.10	2.5						25	540	20
10		CITOCROM 134	E 410 Ni Mo-15	E 134 B 20-	11	4	0.5				0.3	0.04	0.6						13	760	15
11		EXSA 127	E 385-16	E 20255 L Cu B20-	20	25	4.5		1.5			0.03	1.6						35	580	30
12		EXSA 511	ENi Cu-7	EL Ni Cu 30 Mn				62			1	0.03	4			2.7		0.6	0	400	30
13		EXSA 512	ENi Cu	EL Cu ni 30 Mn		29.7						0.01	1.7			0.8			0	358	33
14		EXSA 521	ENi Cr Fe-2	EL Ni Cr 15 Fe Nb	18.5		2				0.6	0.05	2.9			9.6		1.5	25	560	34
15		EXSA 524	ENi Cr Mo-3	EL Ni Cr 20 Mo 9 Nb	21.5		9.5					0.04				4			53	760	30
16		EXSA 717H	ENi Cr Mo-4	EL Ni Mo 15 Cr 15 W	14.4		14.5	4.2				0.02				6.5			62	710	27
17		EXSA 2209	E 2209-16	E 2293 NLR 12	22.6	8.73	3.21			0.15	0.8	0.03	0.8	0.02	0.02				36	700	20
17	INDURA	INDURA 308	E 308		18.7	10.2	0.07				0.67	0.05	0.54	0.02	0.01			19	590	53	
18		INDURA 308L	E 308 L-16		18.7	10	0.18				0.76	0.02	0.63	0.03	0.01			19	590	53	
19		INDURA 309L	E 309L-16		22.5	13.4	0.16				0.8	0.02	0.69	0.02	0.01			23	555	42	
20		INDURA 309Mo L	E 309 MoL-16		22.3	12.5	2.39				0.5	0.02	0.73	0.02	0.01			30	680	40	
21		INDURA 25-20			28.8	21.4	0.1				0.7	0.13	1.25	0.02	0.01			29	593	30	
22		INDURA 29-9S			29	10.1	0.23				0.7	0.11	0.97	0.03	0.01			30	754	32	
23		INDURA 316	E 316		18.7	12.0	2.3				0.8	0.05	1.20	0.02	0.02			26	600	35	
24		INDURA 316L	E 316L-16		18.5	11.7	2.7				0.8	0.02	0.63	0.02	0.01			27	580	48	
25		INDURA 347	E 347-16		18.5	10	0.25				0.9	0.03	0.76	0.03	0.01			19	650	39	
26		INDURA 134	E 410 Ni Mo-1		11.5	4.1	0.48				0.3	0.04	0.48	0.02	0.01		0.40	13	827	17	
27	INDURA 2209	E 2209-16		22.9	10.1	3				0.4	0.03	1.01	0.01	0.01			33	794	27		
28	LINCOLN	JUNGO 4462	E 2209-15		23.5	9	3			0.15	0.5	0.03	1.60					36	800	28	
29		AROSTA 4462	E 2209-16		22.5	9.5	3.2			0.16	1	0.02	0.80					36	500	27	
30		ZERON 100X	E 2553-15	E 2594 NL B 42	25.0	9.5	3.6	0.7	0.8	0.20	0.3	0.03	0.80					40	920	24	

Como primer paso se identificó posibles materiales de aporte de las diferentes empresas del mercado nacional, los cuales se muestran en la tabla 4.7.

Tabla 4.7. Selección de los posibles materiales de aporte.

DATOS		MATERIALES									
		Metal Base 2205	E 316L SOLOEXA	E 385L SOLOEXA	E 385-16 SOLDEXA	E 310-16 SOLOEXA	E 312-16 SOLOEXA	ENiCrMo-4 SOLDEXA	ENiCrMo-4 SOLDEXA	E 2209 SOLOEXA	E 2209 INOURA
Composicion Quimica	Cr	22	19	20	20	25	29	14.4	21.5	22.6	22.9
	Ni	5.7	12.5	25	25	20	10	53	60	8.73	10.1
	Mo	3.1	2.6	4.8	4.5		0.5	15.5	9.5	3.21	3
	Cu			1.5				4.2			
	N	0.17								0.15	
	Si		0.45	0.2		0.5	0.9		0.7	0.8	0.38
	C	0.02	0.02	0.025	0.03	0.1	0.1	0.02	0.04	0.03	0.03
	Mn		1.4	2.5	1.6	2.5	1	6.5	1	0.8	1.01
	P		0.025	0.02		0.025	0.025			0.02	0.011
	S		0.02	0.02		0.02	0.02			0.02	0.013
Fe							6.5	4			
Nb								3			
Propiedades Corrosion	PREN	35	27.58	35.84	34.85	25	30.65	65.55	52.85	35.593	32.8
Propiedades Mecanicas	Resistencia a la Traccion Mpa	620	510	560	580	550 - 640	740 - 840	710	760 - 800	700	794
	%	25	30	35	30	30	25	27	30 - 35	20	27
Diagrama Schaffer	Cr. Equi.	25.1	22.275	25.1	24.5	25.75	30.85	29.9	33.55	27.01	26.47
	Ni Equi.	6.3	13.8	27	26.7	24.25	13.5	58.85	61.7	10.03	11.505
Diagrama WRC	Cr. Equi.	25.1				25	29.5			25.81	
	Ni Equi.	9.8				23.5	13.5			12.78	

4.2.2 Herramientas para la Selección.

Para poder comparar las características de los diferentes materiales de aporte haremos uso de sus hojas técnicas. Y para una posible referencia de las características de la unión nos valemos de herramientas como los diagramas de SCHAEFFER y el diagrama WRC.

4.2.3 Resultados de los Posibles Aportes.

Como primer filtro de selección hacemos una comparación de composición química y características mecánicas entre el material base 2205 y los materiales de aporte de la tabla 4.7.

Una vez hecha esta comparación separamos los materiales de aporte compatibles con el metal base tal como se muestra en la tabla 4.8.

Tabla 4.8 Selección de materiales después de la comparación de Prop. Mecánicas

DATOS		MATERIALES					
		Metal Base 2205	E 310-16 SOLDEXA	E 312-16 SOLDEXA	ENiCrMo-4 SOLDEXA	ENiCrMo-4 SOLDEXA	E 2209 SOLDEXA
Composicion Quimica	Cr	22	25	29	14.4	21.5	22.6
	Ni	5.7	20	10	53	60	8.73
	Mo	3.1		0.5	15.5	9.5	3.21
	Cu				4.2		
	N	0.17					0.15
	Si		0.5	0.9		0.7	0.8
	C	0.02	0.1	0.1	0.02	0.04	0.03
	Mn		2.5	1	6.5	1	0.8
	P		0.025	0.025			0.02
	S		0.02	0.02			0.02
	Fe				6.5	4	
Nb					3		
Propiedades Corrosion	PREN	35	25	30.65	65.55	52.85	35.593
Propiedades Mecanicas	Resistencia a la Traccion Mpa	620	550 - 640	740 - 840	710	760 - 800	700
	%	25	30	25	27	30 - 35	20
Diagrama Schaffer	Cr. Equi.	25.1	25.75	30.85	29.9	33.55	27.01
	Ni Equi.	6.3	24.25	13.5	58.85	61.7	10.03
Diagrama WRC	Cr. Equi.	25.1	25	29.5			25.81
	Ni Equi.	9.8	23.5	13.5			12.78

De esta selección tenemos electrodos del tipo austenítico (E310 – 16), del tipo austeno – ferrítico (E312-16), electrodos de tipo níquel E NiCrMo-4 y E NiCrMo-3 y el material de aporte del tipo duplex E2209 como posibles metales de aportes.

4.2.3.1 Electrodo tipo níquel.

Teniendo en cuenta que los electrodos del tipo níquel poseen un porcentaje de alargamiento superior al material base, podríamos tener problemas por los coeficientes de dilatación que se presentarán durante el proceso de soldadura. Adicional a esto los electrodos de tipo níquel (E NiCrMo – 4 y E NiCrMo – 3) son

relativamente mas caros y recomendables, según su hoja técnica, para trabajos de recubrimientos y reparación de piezas.

Por estos motivos es que descartamos los electrodos del tipo níquel.

4.2.3.2 Electrodo tipo Inoxidable.

Para poder hacer una distinción entre los 3 electrodos del tipo inoxidable posibles utilizamos el diagrama de Schaeffer y el diagrama de WRC para predecir, con cierto acercamiento, las posibles estructuras que se obtendrán.

Según el diagrama de Schaeffer tenemos los siguientes valores para el cromo equivalente y para el níquel equivalente mostrados en la tabla 4.8.

Los cuales ubicamos en el diagrama (Figura 4.1).

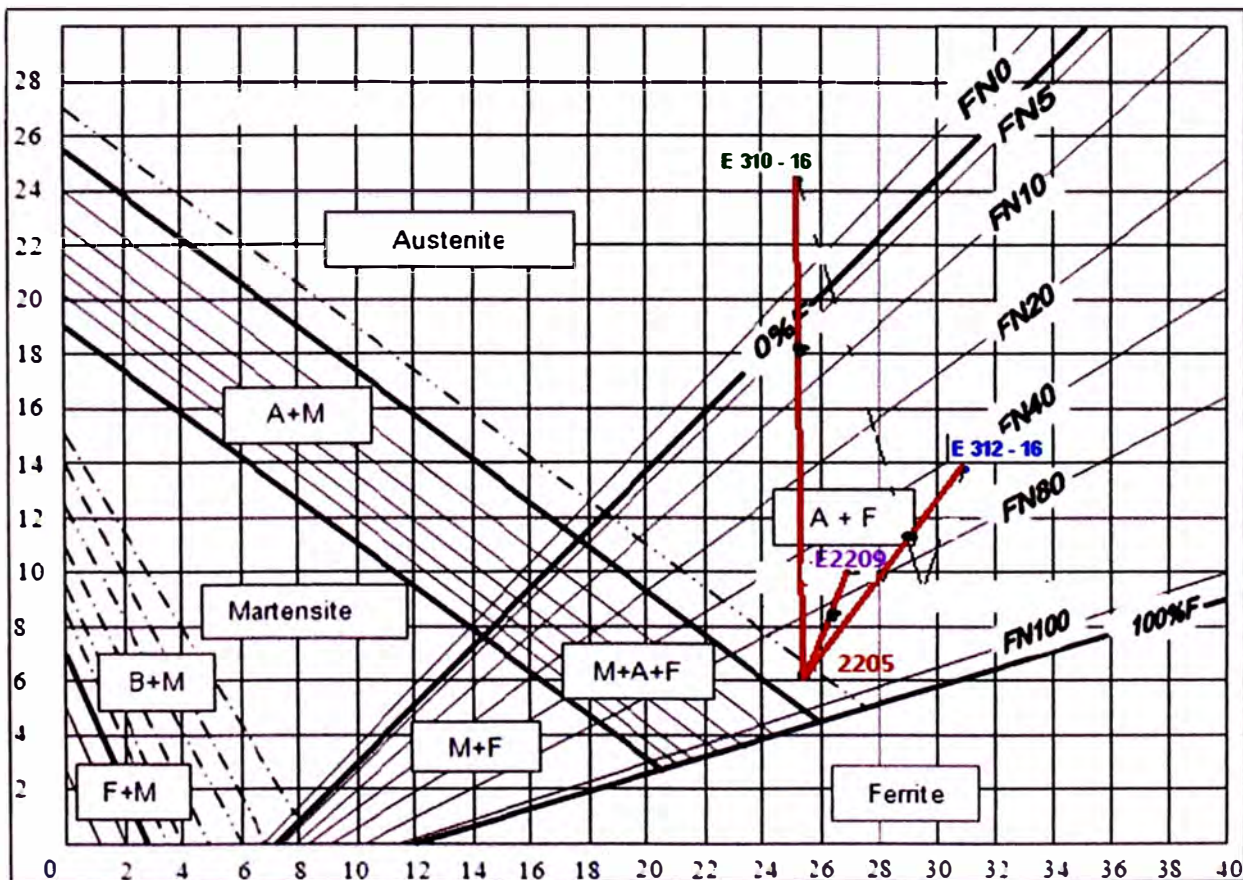


Figura 4.1 Ubicación de las posibles estructuras a obtener con los diferentes materiales de aporte

Según el diagrama podemos ver que la posibilidad de utilizar el electrodo de tipo E310-16 queda descartada ya que a una dilución del 30% para el proceso SMAW el número de ferrita cae a valores de FN 7 lo cual traerá como consecuencia problemas de baja resistencia mecánica y a la corrosión bajo tensión.

Para poder diferenciar entre los electrodos restantes, E312-16 y el E2209, hacemos uso del diagrama WRC (Figura 4.2), que es mas recomendado para aplicaciones en aceros inoxidable dúplex.

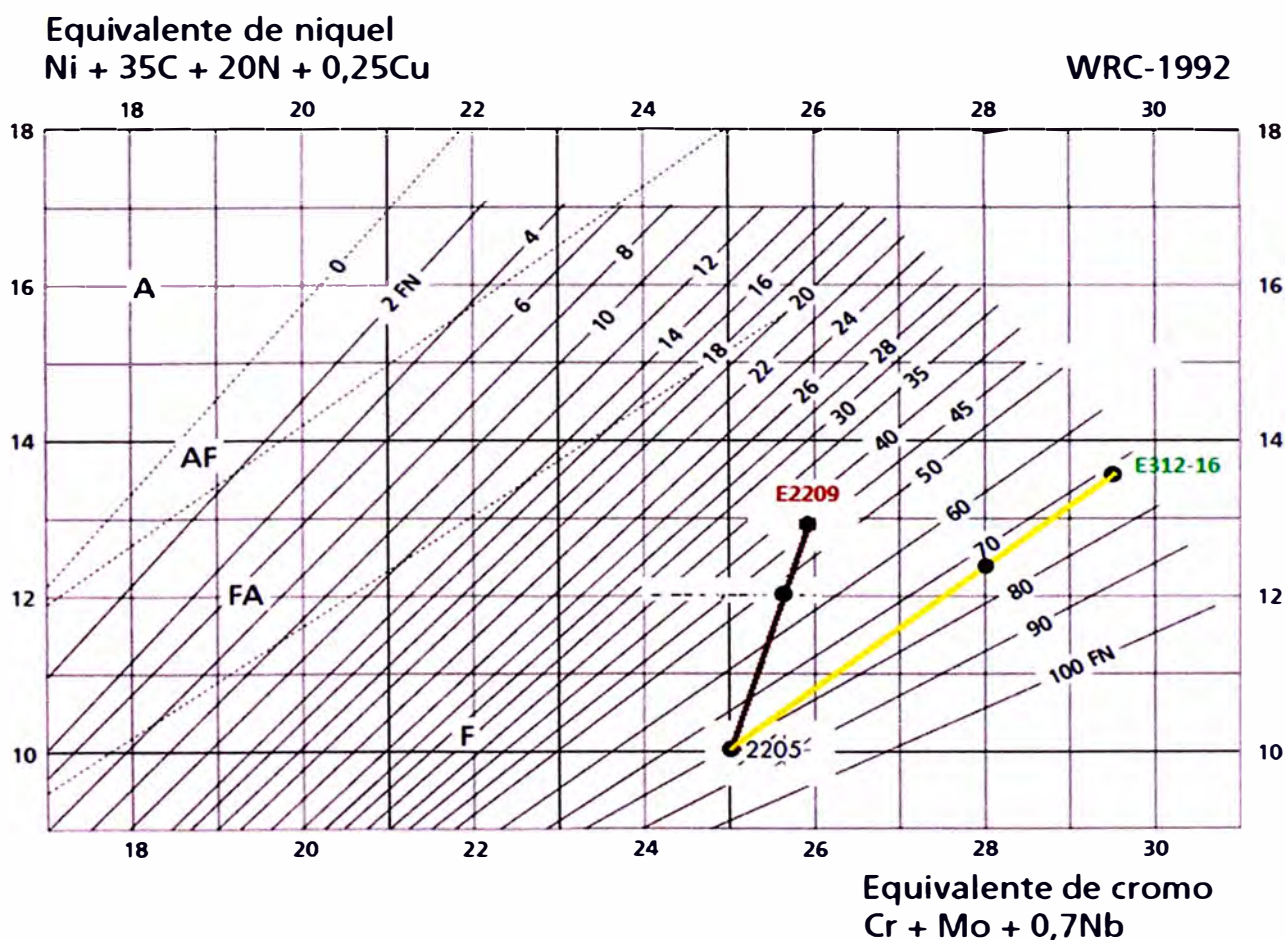


Figura 4.2 Ubicación de el FN para las combinaciones entre el material base y los materiales de aporte.

Del diagrama podemos obtenemos el valor FN para los materiales de aporte y el material base (ver tabla 4.9).

Tabla 4.9 Valores de FN obtenidos del diagrama WRC.

MATERIAL	FN	RANGO FN SEGÚN FICHA TECNICA
2205	80	ACEPTABLE
2205 – E2209	53	ACEPTABLE
2205 – E312 – 16	70 – 75	ACEPTABLE

Con ambos materiales de aporte se cae dentro del rango aceptable de Numero de Ferrita.

4.2.4 Justificación de la Selección del Aporte.

Para seleccionar el aporte idóneo, debemos recordar que los dúplex deben tener un bajo porcentaje de carbono para evitar la formación de carburos. Pues si regresamos a la composición química observaremos que el porcentaje de carbono tiene una diferencia que no podemos pasar por alto (ver tabla 4.10).

Tabla 4.10 Contenido de %C de los posibles Metales de aportes y el metal base.

MATERIAL	E312 – 16	E2209	2205
%C	0.1	0.03	0.02

Ya que este valor de carbono puede generar problemas como por ejemplo la precipitación de carburos se concluye que la elección final será por el material de aporte en presentación de electrodo E2209 – 16.

En la figura 4.3 se muestra la hoja técnica del metal de soldadura seleccionado que es comercializada en nuestro país por la empresa SOLDEXA; cabe mencionar que actualmente ellos tienen estos metales de aporte en STOCK.

EXSA 2209

Electrodos especiales para acero inoxidable



Descripción:

Electrodo revestido para la soldadura de acero inoxidable dúplex UNS S32304.

Norma Técnica

AWS A5.4 – ASME II - C	EN 1600	UNS Number
E2209-16	E 22 9 3 N L R 1 2	---

Análisis químico del metal depositado

C	Si	Mn	Mo	Cr	Ni	S	P	N
0.03	0.80	0.80	3.21	22.6	8.73	0.02	0.02	0.15

Características:

- El EXSA 2209 es un electrodo revestido especial para la soldadura de acero inoxidable dúplex del tipo UNS S32304, UNS S31803 (Aleación 2205). Presenta buena resistencia a la corrosión bajo tensión y asimismo a la corrosión por picaduras. Su uso es recomendable para soldaduras de intercambiadores de calor, depósitos químicos , celdas de flotación, tuberías, etc.

Parámetros de Soldadura (AC o DC < + >):

Díametro (mm)	3.2
Posición	Amperaje
Plana , Filete Horizontal	75 – 120
Horizontal	75 - 120
Vertical ascendente (*)	65 – 90
Sobrecabeza (*)	70 - 110

(*) Solo se realizan cordones cortos y puntos.

Propiedades Mecánicas del Metal Depositado:

Resistencia a la Tracción (MPa)	Elongación en 2"	FN
700 min	> 20%	40

Recomendaciones para su uso:

- Se recomienda resecar los electrodos entre 200 a 250°C por 60 minutos antes de su uso y después mantenerlo en horno de manutención entre 100 a 150°C.
- Emplear el amperaje lo más bajo posible y soldar con arco lo más corto posible, todos estos parámetros en función al espesor a soldar.
- Para una mejor resistencia a la corrosión del cordon de soldadura , aplicar pasta pasivante EXSANOX

Aplicaciones:

- Para aceros inoxidables dúplex SAF 2304, UNS S32304, W 1.4362.
- Para aceros inoxidables dúplex OTK 2205, UNS S31803, W 1.4462



SOLDEXA S.A.

Figura 4.3 Ficha técnica del metal de aporte seleccionado E2209-16.

4.3 TIPO DE JUNTA.

La plancha a emplear para la calificación del procedimiento es de acero inoxidable dúplex 2205 de $\frac{1}{2}$ " de espesor.

Para realizar el soldeo de este tipo de material la elección del tipo de junta y el proceso de preparación de los bordes son muy importantes para obtener buenos resultados. Esto debido a que la penetración y la fluidez del baño de fusión es ligeramente menor que un acero austenítico; por lo tanto la unión se debe diseñar correctamente para poder obtener una buena penetración sin perforar el metal base. El ángulo del chaflán debe ser lo suficientemente grande para permitir al soldador un control pleno del arco, del baño y la escoria.

En las figuras 4.4, 4.5 y 4.6 se muestra los principales tipos de juntas de soldeo manual con SMAW para este material en función del espesor del material base:

Unión I, $t < 2,5$ mm
 $D = 1,0-2,0$ mm
 Una cara, con o sin soporte reverso

Unión I, $t < 4,0$ mm
 $D = 2,0-2,5$ mm
 Ambos lados, sin soporte reverso
 pero con desbarbado de raíz

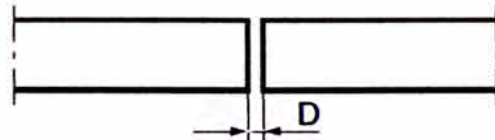


Figura 4.4 Diseño de junta a tope de bordes rectos.

Unión V, $t = 4-16$ mm
 $\alpha = 60^{\circ}-70^{\circ}$
 $C = 0,5-1,5$ mm
 $D = 2,0-4,0$ mm (4-6 mm contra un soporte)
 Una cara, con o sin soporte en el reverso

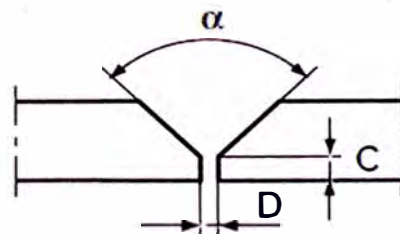


Figura 4.5 Diseño de junta tipo a tope en V.

Unión U, $t > 20$ mm
 $\alpha = 10^\circ$
 $R = 8$ mm
 $C = 2,0-2,5$ mm
 $D = 2,0-2,5$ mm (4-6 mm contra un soporte)
 Soldadura por ambos lados, sin soporte en el reverso pero con desbarbado de raíz

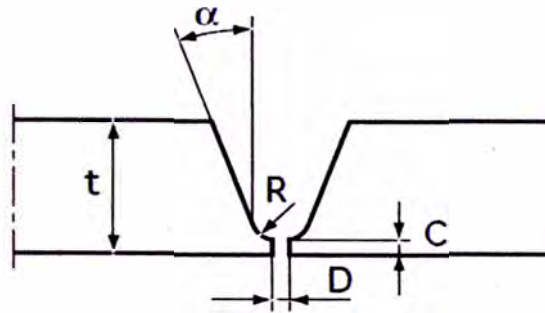


Figura 4.6 Diseño de junta a tope en U.

En vista que nuestro material (1/2") esta dentro del rango de la segunda junta (4mm – 16mm) para nuestro WPS emplearemos la junta en V con soldadura de reverso.

4.4 TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO.

En los aceros inoxidable dúplex la fragilización viene determinada generalmente por el crecimiento de grano de la estructura ferrítica. En el proceso de soldeo el calor excesivo origina el incremento de la ferrita y el crecimiento de grano de la ferrita. Cuando se enfría el metal base la austenita solo se reforma parcialmente obteniéndose una zona de soldadura de grano excesivamente grande con un contenido de ferrita mayor que antes de realizar el soldeo.

Es por esta razón que en general para los aceros inoxidable dúplex no se necesita precalentamiento. Solo se recomienda para bajas temperaturas precalentar hasta los 50°C para expulsar la humedad del metal base y así evitar la formación de poros. Para materiales gruesos o piezas embridadas puede ser conveniente precalentar hasta un máximo de 150°C.

La temperatura entre pasadas para nuestro material base puede ser como máximo 200°C, esto debido al peligro de sensibilización del metal base.

Por lo tanto no aplicaremos temperatura de precalentamiento y se aplicara una temperatura interfase de 150°C.

4.5 TRATAMIENTO TERMICO POST SOLDADURA.

Los aceros inoxidable dúplex no necesitan tratamiento Térmico Post Soldadura. Sin embargo en algunas situaciones se les puede someter a un tratamiento de disolución o un revenido de alivio de tensiones.

4.6 CARACTERISTICAS ELECTRICAS

Las características eléctricas vienen definidas por los rangos recomendados por el fabricante de los electrodos revestidos (ver tabla 4.11).

Tabla 4.11 Amperajes recomendados por el fabricante de electrodos E2209.

Diámetro (mm)	3.2
Posición	Amperaje
Plana , Filete Horizontal	75 – 120
Horizontal	75 - 120
Vertical ascendente (°)	65 – 90
Sobrecabeza (°)	70 - 110

4.7 APORTE TERMICO.

Nuestro material base UNS 32205 denominado también 2205 se debe soldar con bajos aportes térmicos según se aprecia en tabla 4.12.

Tabla 4.12 Aportes térmicos recomendados para aceros dúplex.

Recomendaciones generales:	
2304	máx. 2,0 kJ/mm
2205	máx. 2,5 kJ/mm
LDX 2101, SAF 2507	máx. 1,5 kJ/mm

Por lo tanto el aporte térmico máximo que podemos aplicar es 2,5KJ/mm. Con la formula (2.4), el voltaje y el amperaje calcularemos la velocidad de avance.

$$\text{Aporte de calor} = \frac{U \times I}{V \times 1000} \left\{ \frac{U \times I}{\text{mm/s} \times 1000} = \text{kJ/mm} \right\} \begin{matrix} U = \text{Voltaje} \\ I = \text{Corriente} \\ V = \text{velocidad} \end{matrix}$$

Donde: $U = 19V$ $I = 80A$ $\rightarrow v \geq 0.60\text{mm/s}$

Por lo tanto obtenemos que podemos emplear como mínimo una velocidad de avance de 3cm/min.

Por otro lado tampoco podemos aplicar un bajo aporte térmico pues se conseguirían enfriamientos muy rápidos originando elevados contenidos de ferrita; un valor mínimo de aporte térmico es 0.5KJ/mm.

Entonces $v_{\max} \leq 18.6\text{cm/min}$.

Por lo tanto para nuestro procedimiento emplearemos una velocidad de avance:

$$V = 7.0\text{cm/min} - 9.5\text{cm/min}$$

4.8 TECNICA DE SOLDEO A EMPLEAR.

En especial para la posición 3G se recomienda movimientos en zig-zag de hasta 20mm y además la soldadura normalmente se debe realizar con un ángulo entre el electrodo y la dirección de avance de 100° , es decir el electrodo debe estar inclinado hacia la parte inferior. Esto con el objetivo de tener un mayor control del arco y del baño de fusión.

4.9 LIMPIEZA POSTERIOR AL PROCESO DE SOLDADURA.

La limpieza post soldadura de la ZAC y el cordón de soldadura es importante para obtener una resistencia a la corrosión plenamente satisfactoria. Los aceros inoxidable dúplex generalmente son mas difícil de decapar que los acero austeníticos; por lo cual se debe decapar con productos decapantes fuertes.

Para nuestro caso emplearemos el siguiente procedimiento:

- 1.- Limpieza mecánica con escobillas de acero inoxidable.
- 2.- Decapado.
- 3.- Pasivado.

4.10 WPS.

ESPECIFICACIONES DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA DE ACUERDO A: CODIGO ASME SECCION IX					
PROCESO DE SOLDADURA: SMAW			Fecha: 20/09/12		
TIPO: MANUAL			Revisión: 01		
JUNTA (QW-402)			Grafico de junta (detalles)		
Diseño de la junta: A tape					
Respaldo: N/A					
Anillo de respaldo (tipo): N/A					
Otros: N/A					
METALES BASE (QW-403)					
P.Nº: 10H.		Grupo Nº: 1.		Para	
P.Nº: 10H.		Grupo Nº: 1.			
Tipo de especificación y grado: SA-240 y UNS 32205.					
Para Tipo de especificación y grado: SA-240 y UNS 32205.					
Propiedades Mecánicas: Resistencia a la Tracción Mínima especificada 620 MPa.					
Para Propiedades Mecánicas: Resistencia a la Tracción Mínima especificada 620 Mpa.					
Otro: N/A					
METALES DE APORTE (QW-404) (pases)	1º pase	2º pase	3º pase	4º pase	5º pase
Especificación (SFA) N°	A5.9	A5.9	A5.9	A5.9	A5.9
AWS N°(CLASE)	E2209-16	E2209-16	E2209-16	E2209-16	E2209-16
Diámetro de metal de aporte	1/8"	1/8"	1/8"	1/8"	1/8"
Rango de espesor por pase	2 – 4 mm	2 – 4 mm	2 – 4 mm	2 – 4 mm	2 – 4 mm
Rango de espesor por Tipo	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Otro: Proceso de soldadura	SMAW	SMAW	SMAW	SMAW	SMAW

POSICIONES (QW-405)		TRAT. TERMICO DESPUES DE LA SOLDADURA (QW-407)						
Posición (es) de Soldadura: Vertical		Rango de Temperatura: N.A.						
Progresión de la soldadura: Ascendente		Rango de Tiempo: N.A.						
PRECALENTAMIENTO (QW-406)		GAS (QW-408) Si o No ☒						
Temp. Pre calentamiento Min: 20°C		Composición %: N.A.						
Temp. Entre pasadas Max. : 150°C.		Gas (es): N/A			Veloc. de flujo			
Mantenimiento del pre calentamiento: No		Protección			N.A.			
		Purga			N.A.			
CARACTERISTICAS ELECTRICAS (QW-409)								
Corriente AC o DC: DC				Polaridad: Inversa (E+)				
Amps. (Rango): 70 A – 80 A.				Volts (Rango) : 18V - 24 V.				
(El rango de corriente y tensión deberá ser registrado para cada diámetro del metal de aporte, posición, espesor, De electrodo, etc. Esta información podría ser listada en una forma tabular similar a la mostrada abajo).								
Modo de transferencia de metal para GMAW: N/A.								
Rango de velocidad de alimentación del alambre: N/A.								
TECNICA (QW-410)								
Limpieza inicial y entre pasadas: Esmerilar con disco de desbaste abrasivo exclusivo para este material base.								
Tipo Oscilación: N/A.								
Distancia de trabajo de la boquilla: N/A								
Pasada única o múltiple pasada: Múltiple pasada.								
Electrodo único o múltiple: Electrodo único para todos los pases.								
Velocidad de avance: 7,0 – 9,5 cm/min.								
Martillado: N/A.								
Otro: N/A.								
Nº Pases	Proceso	Metal de aporte		Corriente		Rango de Voltaje	Rango de Velocidad	Limpieza Post. Soldadura
		Clases	Diám.	Tipo de polaridad	Amperaje			
1 – 5	SMAW	E2209-16	1/8"	DC EP	75A-90 A	18V- 24V	7 - 9.5 cm. /min.	Limpieza mecánica con cepillo de ac. inox, decapado y pasivado.

CAPITULO V

CALIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA.

La calificación del WPS del material estudiado deberá ser abordada en un sentido más amplio que los aceros convencionales, esto con el objetivo de demostrar que los procedimientos de soldeo que serán aplicados durante la fabricación no producirán una inaceptable pérdida de las propiedades ingenieriles del acero duplex, especialmente resistencia mecánica y a la corrosión.

Por ello los ensayos para la calificación del procedimiento de soldadura han sido seleccionados para intentar describir la soldabilidad de un **ACERO INOXIDABLE DUPLEX UNS S32205** con un material de aporte tipo **E2209** en términos de su resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y algunas características específicas propias de este tipo de acero tales como la presencia de fases intermetálicas perjudiciales.

Los cupones a soldar están en función a la cantidad de probetas que se necesita para poder realizar los ensayos correspondientes.

La cantidad y tamaño de probetas está definida a través de las exigencias de los códigos de referencia utilizados, mencionados en cada uno de los ensayos a realizar, pero como base general los exigidos según **API 650 APENDICE X** y **ASME SECCION IX**.

5.1 TIPO DE ENSAYOS REQUERIDOS.

Según la norma API 650 Apéndice X para calificar el WPS se debe evaluar según ASME SECCION IX y además también según los criterios de ASTM A923; pero como el presente trabajo busca tener mayor información sobre la soldabilidad de este material se está adicionando algunos ensayos que nos permitirán identificar zonas frágiles y la dilución de la junta soldada.

Los Ensayos a emplear para la calificación del procedimiento de soldadura se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.1 Ensayos requeridos para calificación de procedimiento de soldadura.

Tipo de Ensayo	Número de Probetas	Referencia
Ensayo de Tracción	2	ASME SECCION IX
Ensayo de Dobleza	4	ASME SECCION IX
Ensayo de Corrosión	2	ASTM G48
Ensayo de Macrografía	1	ASTM E 340
Ensayo de Dureza	1	EN ISO 6507-1
Ensayo para Identificación de Fases Inter-metálicas	2	ASTM A923

Al observar la tabla notamos que tenemos ensayos de distintas normas por lo cual para no causar confusión se prepara 2 cupones de soldadura; el cupón 1 según recomendación de ASME IX y el cupón 2 que se empleara para obtener las probetas para los demás ensayos.

5.2 DIMENSIONES PARA CUPONES Y UBICACION DE PROBETAS.

En las figuras No 5.1 y 5.2 se muestran los 2 cupones de soldadura, las cuales serán soldadas según el WPS a calificar, de estas se obtendrán las probetas para los ensayos correspondientes.

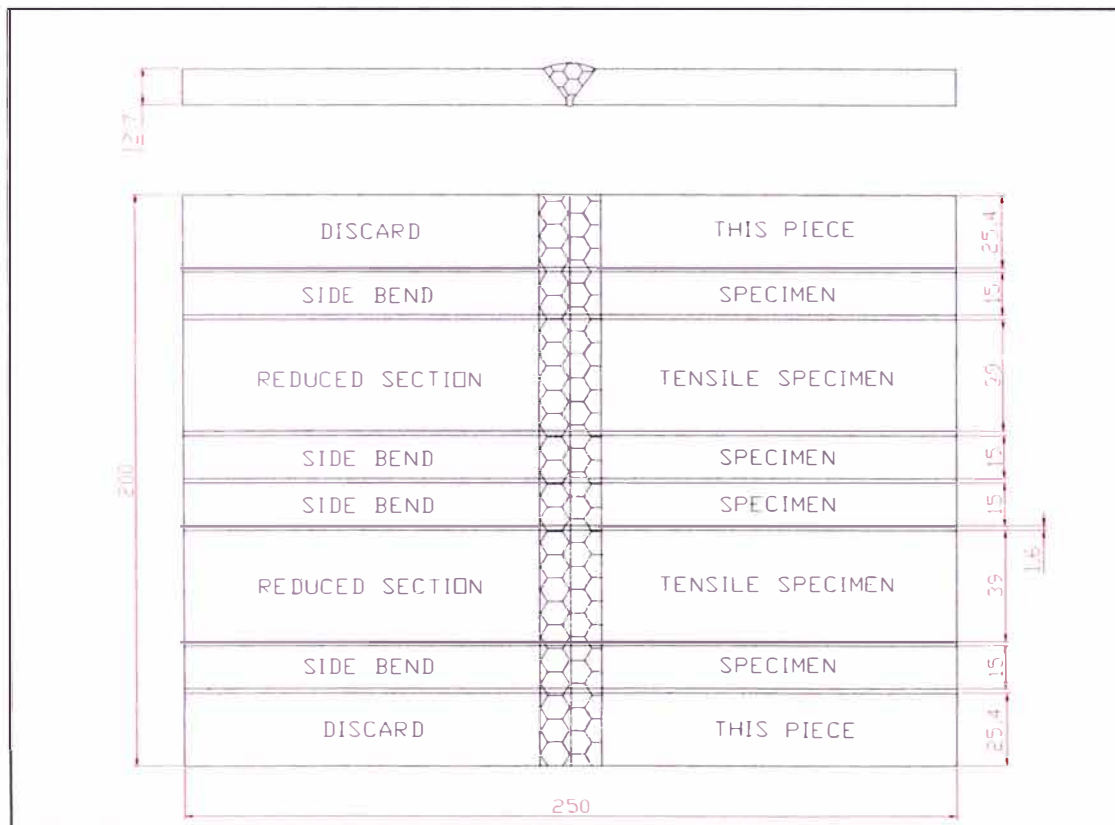


Figura 5.1 Dimensiones y ubicación de probetas en CUPON N°1 según ASME IX.

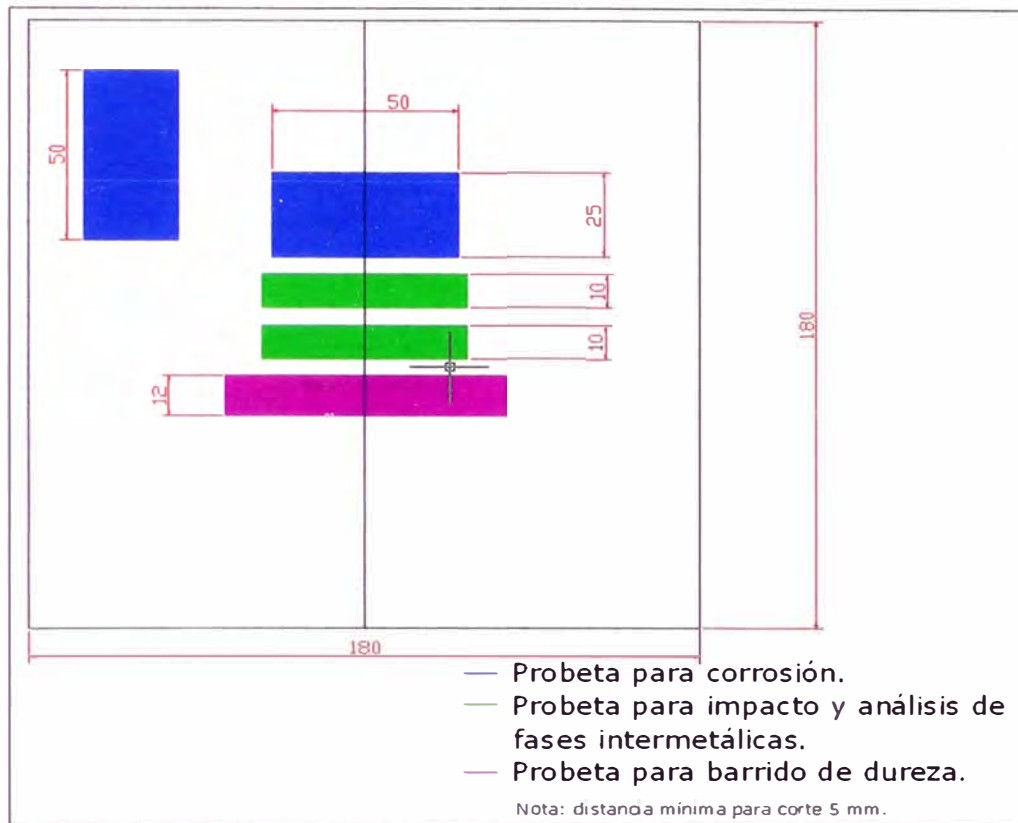


Figura 5.2. Dimensiones y ubicación de probetas en CUPON N°2.

5.3 INSPECCION VISUAL

Según QW-194 se mostrará penetración de junta completa con fusión completa de metal de soldadura y de metal base.

5.4 ENSAYO DE TRACCION (Según ASME IX (QW-160))

Este ensayo se realiza para determinar la resistencia mecánica de las uniones soldadas y en base al material base y al código empleado establecer un valor mínimo de aceptación.

Según la norma empleada necesitamos 2 probetas de sección reducida las cuales las obtendremos de nuestro cupón de soldadura No 1; según figura 5.1.

Las probetas para el ensayo de tracción se prepararán cortando con plasma el cupón de soldadura en secciones rectas aproximadamente rectangulares.

Luego estas serán maquinadas hasta obtener las dimensiones y la forma adecuada como se muestra en figura 5.3.

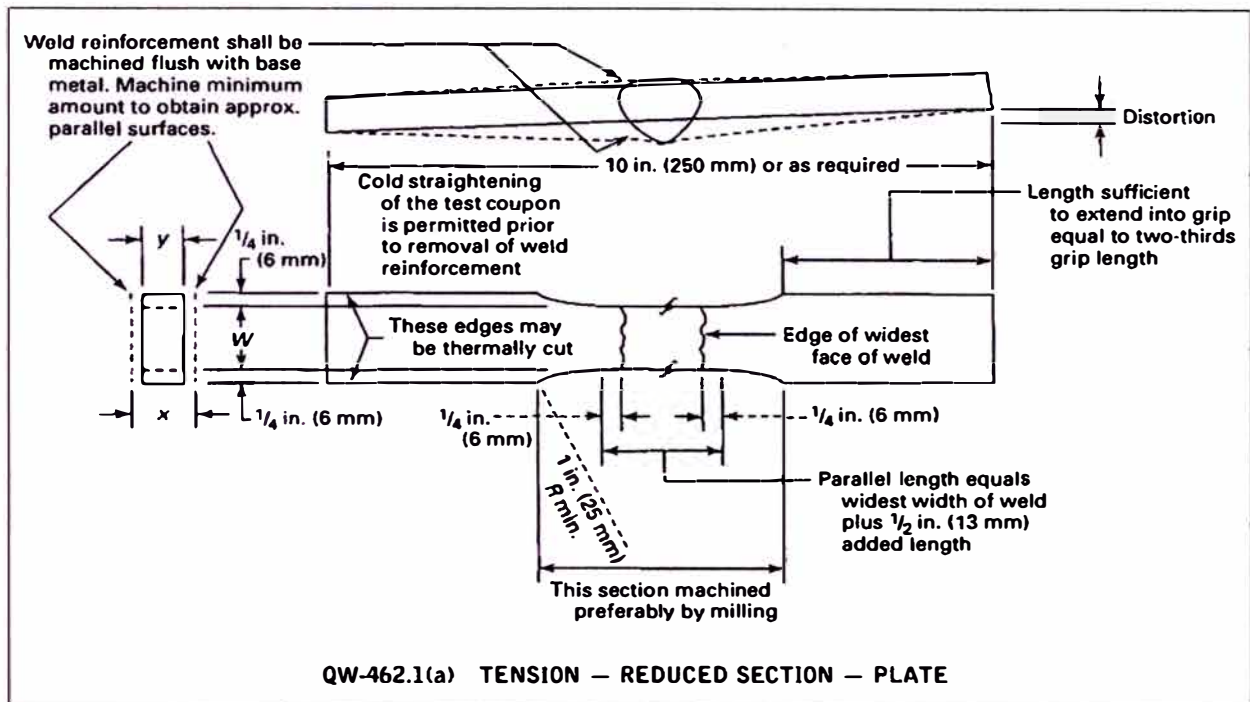


Figura 5.3 Dimensiones generales de la probeta para ensayo de tracción según ASME SECCION IX.

Donde:

x = coupon thickness including reinforcement
 y = specimen thickness
 T = coupon thickness excluding reinforcement
 W = specimen width, 3/4 in. (19 mm)

La probeta de prueba de tensión será sometida a carga de tensión hasta su ruptura. La resistencia de tensión máxima se calculará con dividir la carga total de rotura por el área de la sección reducida de la probeta, según se calculó por mediciones reales hechas antes que la carga sea aplicada.

Según los valores recomendados por la norma nuestras probetas para este ensayo tendrán las dimensiones mostradas en la figura 5.4.

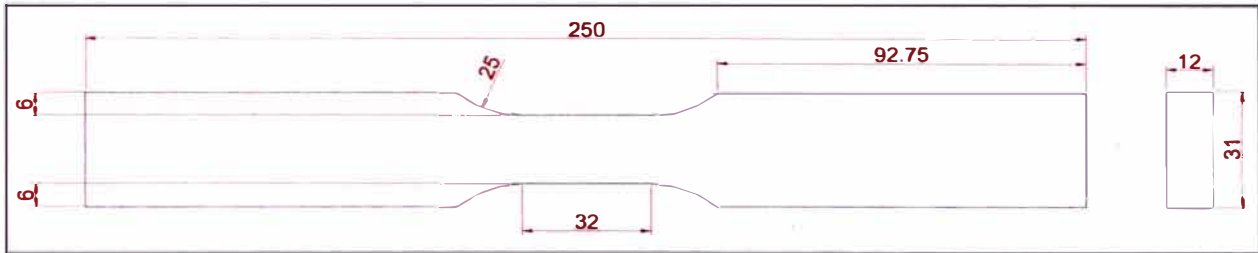


Figura 5.4 Dimensiones de probetas para ensayo de tracción.

Criterios de Aceptación

Según código **ASME SECCION IX (QW-163)**; se acepta el procedimiento de soldadura si la resistencias máxima obtenida en el ensayo no es menor al mínimo valor especificado para el material base; pudiendo ocurrir la rotura en el metal base, ZAC o zona de soldadura.

Para nuestro caso la menor resistencia especificada del **UNS 32205** es 620 MPa por lo cual no se aceptara el procedimiento si los resultados del ensayos son menores a este valor.

Si la rotura se produjera solo en el metal base, se aceptara el procedimiento si la resistencia máxima obtenida no es menor de 589 MPa (95% de 620MPa).

5.5 ENSAYO DE DOBLEZ (Según ASME IX (QW-160))

Este ensayo se realiza para evaluar la presencia de zonas frágiles en la junta soldada (ZAC y cordón de soldadura).

Las muestras para el ensayo de doblado se prepararán cortando planchas de secciones rectas aproximadamente rectangulares. Las superficies de corte se designarán como los lados del espécimen. Las otras dos superficies serán llamadas de cara y de raíz, siendo la superficie de cara la de mayor ancho de soldadura. Estas muestras son de 5 tipos, los que dependen si el eje de la soldadura es transversal o paralelo al eje longitudinal de la muestra y de cual superficie es el lado

convexo (exterior) del espécimen de doblez. A continuación se detallara solo 3 pues son las que se pueden aplicar en el presente trabajo.

5.5.1 Dobleza Transversal de lado (QW-161.1).

Cuando la soldadura es transversal al eje longitudinal de la probeta y una superficie del lado sea la parte convexa de la probeta doblada. Este tipo de ensayo se aplica mayormente cuando se trabaja con materiales gruesos mayores a 10mm de espesor. La forma y las dimensiones de las probetas para el doblado transversal de lado se muestran a continuación en la figura 5.5 y en la tabla 5.2.

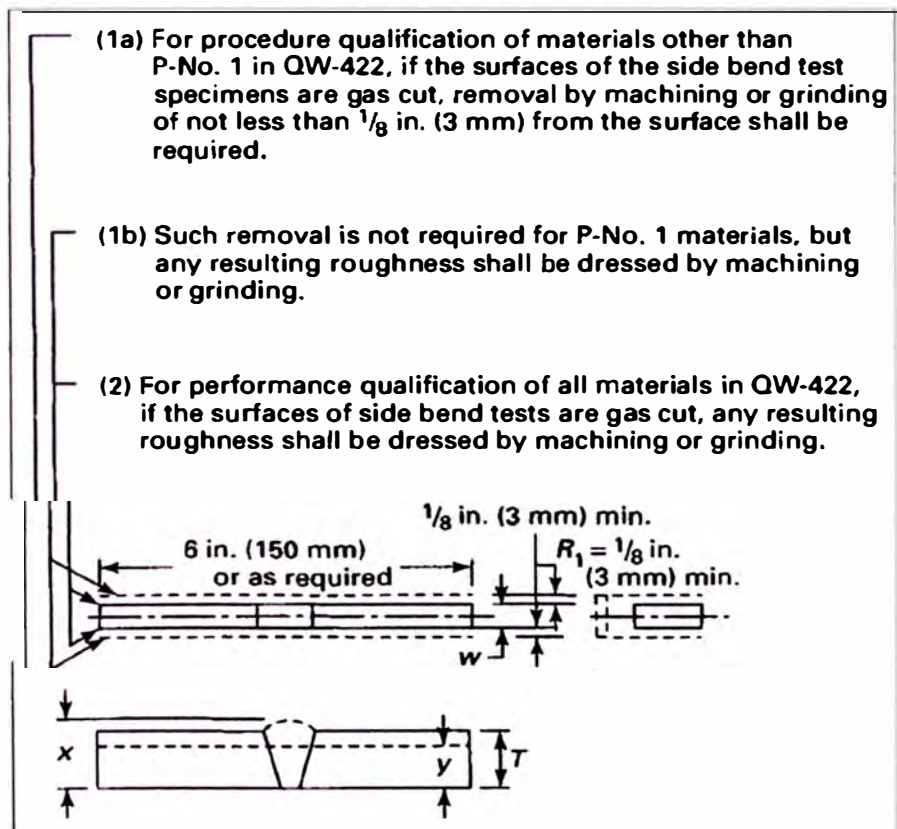


Figura 5.5 Geometría y dimensiones generales para la probeta de doblado de lado según ASME IX - QW-462.2.

Tabla 5.2 Dimensiones finales para especímenes en el ensayo de doblez de lado según ASME IX - QW-462.2.

T , in. (mm)	y , in. (mm)	w , in. (mm)	
		P-No. 23, F-No. 23, or P-No. 35	All other metals
$\frac{3}{8}$ to $1\frac{1}{2}$ (10 to 38), incl.	T	$\frac{1}{8}$ (3)	$\frac{3}{8}$ (10)
$>1\frac{1}{2}$ (38)	Note (1)	$\frac{1}{8}$ (3)	$\frac{3}{8}$ (10)

NOTE:

(1) When specimen thickness T exceeds $1\frac{1}{2}$ in. (38 mm), use one of the following.

(a) Cut specimen into multiple test specimens y of approximately equal dimensions [$\frac{3}{4}$ in. (19 mm) to $1\frac{1}{2}$ in. (38 mm)]. y = tested specimen thickness when multiple specimens are taken from one coupon.

(b) The specimen may be bent at full width. See requirements on jig width in QW-466.1.

5.5.2 Doblez Transversal de Cara (QW-161.1).

Cuando la soldadura es transversal al eje longitudinal de la probeta y la superficie de la cara es la parte convexa de la probeta doblada. Este tipo de ensayo se aplica en conjunto con el doblez de raíz y para materiales generalmente menor e igual a 10mm de espesor. La forma y las dimensiones de las probetas en la figura 5.6 y en la tabla 5.3.

5.5.3 Doblez Transversal de Raiz (QW-161.2).

Cuando la soldadura es transversal al eje longitudinal de la probeta y la superficie de la raíz es la parte convexa de la probeta doblada. Este tipo de ensayo se aplica en conjunto con el doblez de cara y para materiales generalmente menor e igual a 10mm de espesor. La forma y las dimensiones de las probetas en la figura 5.6 y en la tabla No 5.3.

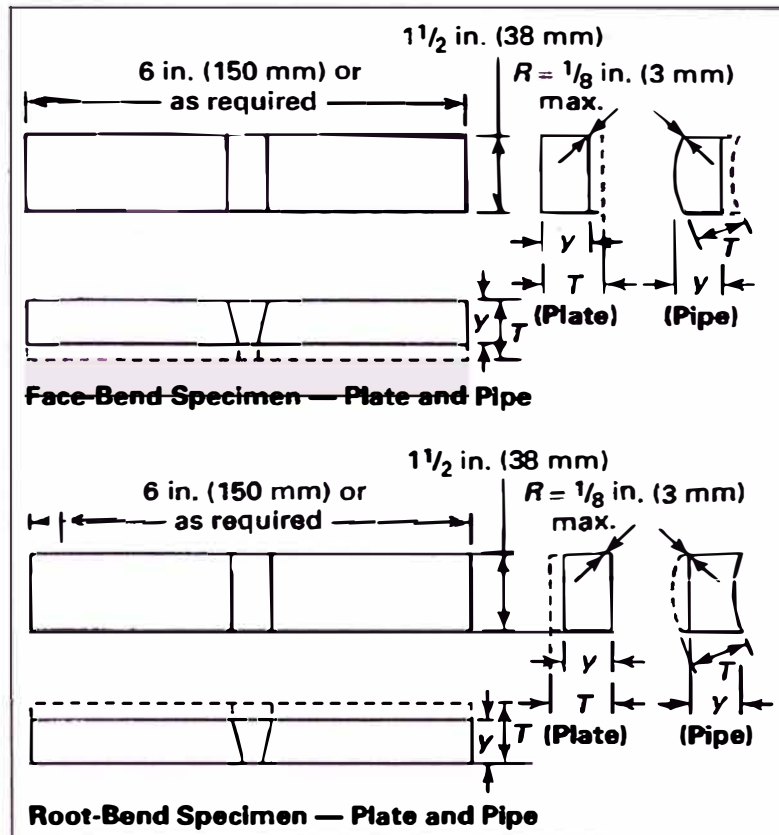


Figura 5.6 Especímenes para doblado transversal de cara y raíz QW-462.3 (a).

Tabla 5.3 Dimensiones para especímenes en el ensayo de doblez de cara y raíz.

Root-Bend Specimen — Plate and Pipe		
T , in. (mm)	Y , in. (mm)	
	P-No. 23, F-No. 23, or P-No. 35	All Other Metals
$\frac{1}{16} < \frac{1}{8}$ (1.5 < 3)	T	T
$\frac{1}{8} - \frac{3}{8}$ (3-10)	$\frac{1}{8}$ (3)	T
$> \frac{3}{8}$ (10)	$\frac{1}{8}$ (3)	$\frac{3}{8}$ (10)

Para el presente trabajo se considerara únicamente 04 probetas de doblado transversal de lado (QW-161.1) tal como se detalla en la figura 5.7, de acuerdo a lo especificado en (QW-462.2, Figura 5.5 y Tabla 5.2).

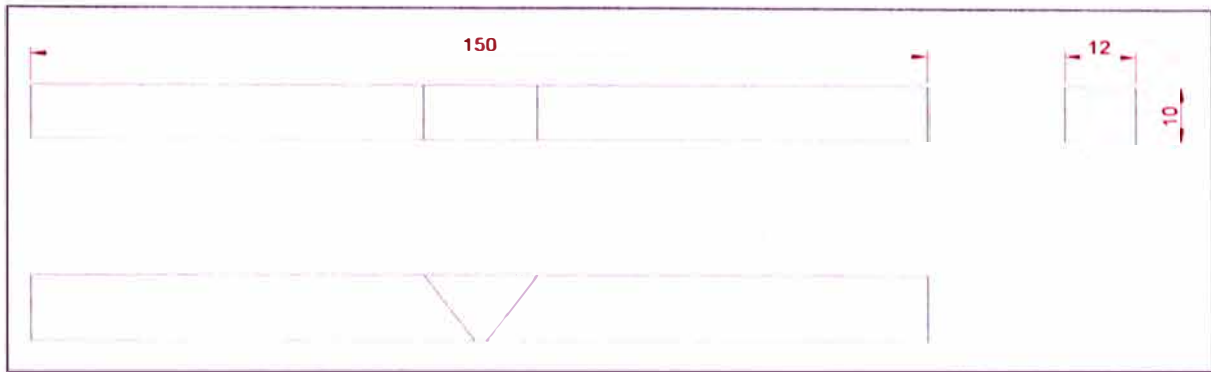


Figura 5.7 Dimensión de probeta para ensayo de doblado de lado.

Criterio de aceptación.

Según código ASME (QW-163), el criterio de aceptación de este ensayo establece que no deberán haber defectos abiertos en la soldadura o en la ZAC que excedan de 3mm medido en cualquier dirección sobre la superficie convexa del espécimen después de doblado. Los defectos abiertos que ocurran en las esquinas del espécimen no se tomarán en cuenta a menos que haya evidencia precisa de que ellos resultan por falta de fusión, inclusiones de escoria u otros defectos internos.

5.6 ENSAYO DE CORROSION (Según Norma ASTM G48)

Desde el punto de vista de la corrosión un cordón de soldadura será considerado el eslabón débil de la estructura, ante esta premisa y para asegurar la continuidad de la estructura en todos los sentidos se propone realizar el siguiente ensayo que nos permitirá comparar la resistencia del material base **UNS 32205** que posee un número **PREN** mayor a 34 con la resistencia del cordón de soldadura y comparar ambos resultados.

El método de medida de la corrosión por picadura indicado en la norma **ASTM G48 (Método A)**, *“Standard test methods for pitting and crevice corrosion resistance of stainless steels and related alloys by the use of ferric chloride*

solution” consiste en la inmersión de las muestras a ensayar, durante un periodo de 72 horas, en una solución de cloruro férrico al 6%.

La evaluación de la resistencia de los aceros a la corrosión por picaduras se realiza por comparación de la pérdida de peso de las muestras. (Practica G-1)

La dimensión de las probetas recomendadas en la citada norma son: 25 x 50mm (de acuerdo a 7.1 “Test Specimens” –ASTM G48), aunque se pueden ensayar algunas otras dimensiones, lo básico para la comparación es que las probetas posean la misma dimensión.

Las probetas deben ser pulidas, de acuerdo a 7.4, con papel abrasivo A120.

Para nuestro trabajo se ha estimado realizar al menos 1 comparación entre el material base y la unión soldada, siguiendo lo indicado por ASTM G-48 Método A, como se muestra en la figura 5.8.

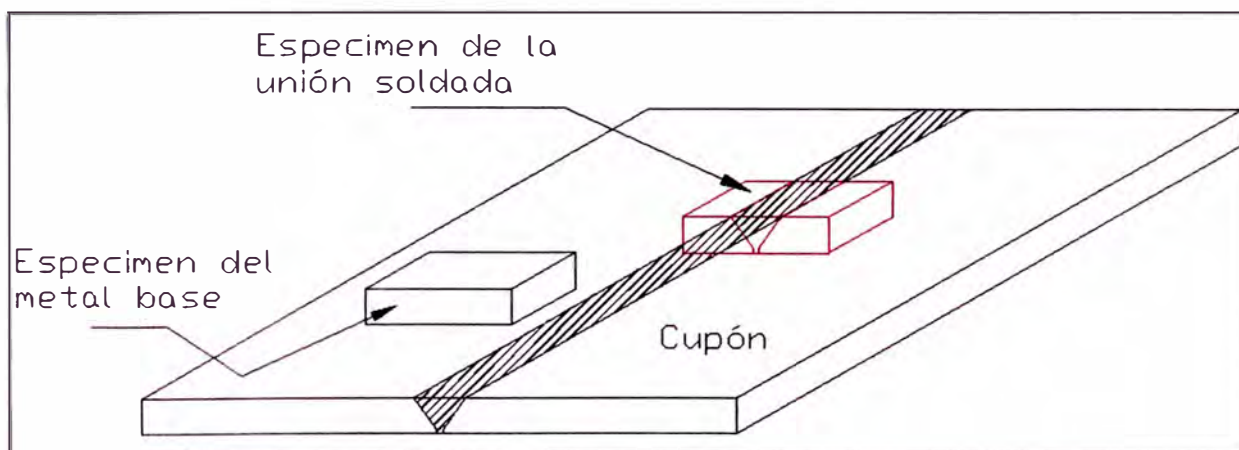


Grafico 5.8 Especímenes para ensayo de corrosión (según ASTM G48 Método A)

5.7 ENSAYO MACROGRAFIA.

El propósito del ensayo es poder apreciar las diferentes heterogeneidades que se pueden formar en el cordón de la soldadura y las zonas adyacentes (ZAC) debido al propio proceso de soldadura, además también permitirá poder apreciar la penetración así como la dilución del material de aporte.

Normas relacionadas.

ASTM E 112 "Standard test methods for determining average grain size".

ASTM E 3 "Standard guide for preparation of metallographic specimens".

ASTM E 340 "Standard test method for macro-etching metals and alloys".

ASTM E 7 "Standard terminology relating to metallography".

Probeta.

La norma no exige un determinado tamaño de probeta, sin embargo sugiere que esta debe ser de un tamaño suficiente lo cual permita su manipulación para el pulido. Debido a que el caso de estudio en si es poder apreciar las diferentes heterogeneidades que se pueden formar en el cordón de la soldadura, la probeta será tomada en la ZAC y en el cordón de soldadura (ver figura 5.9).

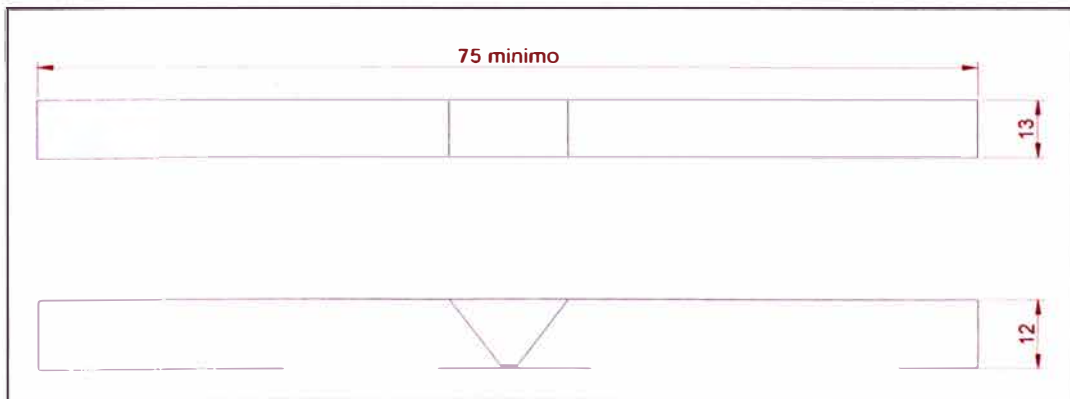


Figura 5.9 Especímenes para ensayo de macrografía

5.8 ENSAYO DE DUREZA.

Poder determinar el cambio de dureza en el cordón de soldadura y en las zonas adyacentes (ZAC) debido al proceso propio de soldadura (medir fragilidad), esto permitirá tener un mayor conocimiento sobre el efecto de las variables del procedimiento de soldadura en el material base así como en el cordón de soldadura.

Normas relacionadas:

EN ISO 1043-1 "Destructive tests on welds in metallic materials. Hardness testing"

EN ISO 6507-1 "Metallic materials —Vickers hardness test"

Probeta.

La probeta a usar será la misma que se utilizara para el ensayo macrográfico. La línea de indentación será realizada de acuerdo a la figura 5.10 (Para más detalle ver norma relacionada).

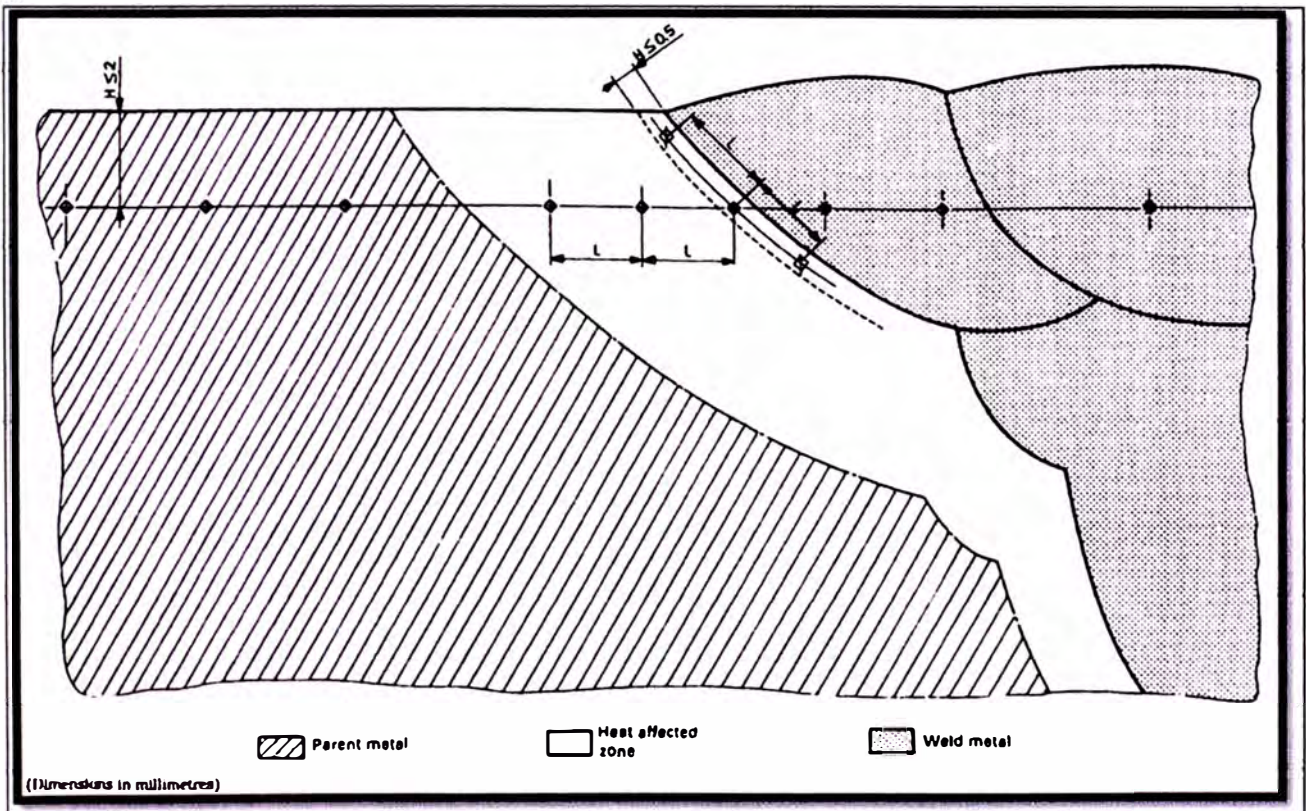


Figura 5.10 Especímenes para ensayo de dureza Vickers.

La distancia entre puntos de medición de dureza será L (5 mm), teniendo en la zona ZAC tres lecturas y teniendo 5 lecturas en el cordón de soldadura. La distancia H tendrá tres medidas de manera que pueda compararse, si es que se da, el cambio de dureza a medida que avanza el proceso de soldadura. Medida en el pase de raíz, pases de relleno y pases de acabado.

5.9 ENSAYO DE IDENTIFICACION DE FASES INTERMETALICAS.

Para la identificación de fases intermetalicas la norma ASTM A923 establece 3 métodos:

Método A mediante la inspección metalográfica.

Método B mediante el ensayo de Impacto.

Método C mediante el ensayo de Corrosión.

Además también se recomienda siempre realizar al menos 2 métodos; en el presente trabajo se aplicara el Método A y el Método B.

5.9.1 Método A.

Generalmente se emplean las mismas probetas a emplear en el ensayo de impacto; las cuales deben ser pulidas con un acabado metalográfico adecuado para la examinación a 400X después del ataque químico.

La solución para el ataque será preparada agregando 40 gramos de Hidróxido de Sodio (NaOH) de grado reactivo a 100 g de agua destilada.

Posteriormente del examen metalográfico, se realizara el ensayo de impacto con estas probetas.

Criterio de Aceptación.

ASTM A923 permite el uso del examen metalográfico (método A), como criterio de aceptación, pero no de rechazo. Una ventaja del método A es la identificación de la línea central de fases intermetálicas (figura 5.11), cuya presencia descalifica el material según el método A; pero no significa que esta ya no se deba ensayar el material por el método B, ensayo de impacto, cuyo resultado dará la decisión final.

Aunque A923 establece que el método A no debería ser utilizado para rechazo, la presencia de fases intermetálicas puede conducir a una laminación de la placa

durante el corte térmico o soldadura; por lo cual si se quisiera ser más exigente se podría plantear que toda plancha con presencia de fases intermetálicas deberá ser rechazada.

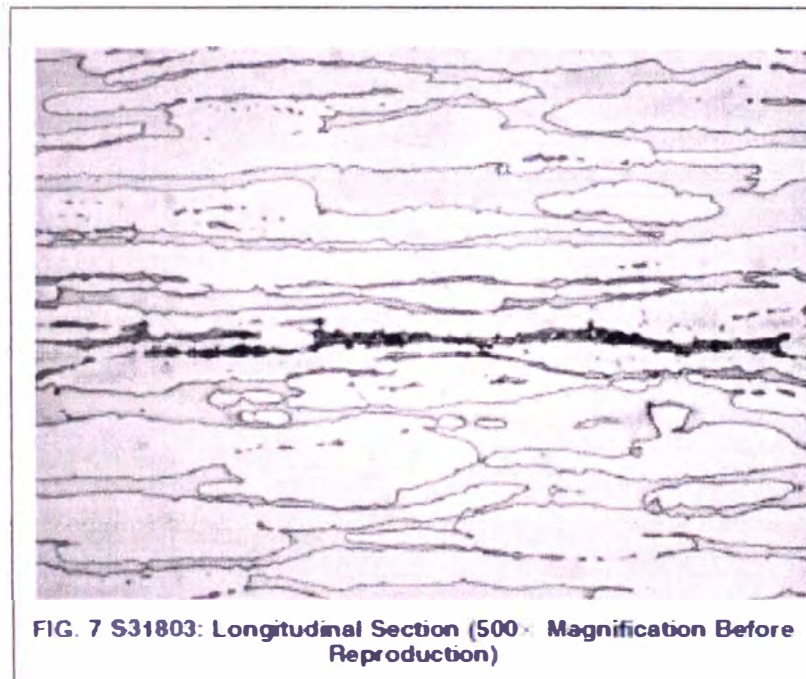


Figura 5.11 Presencia de fase intermetálica indicativa de rechazo.

5.9.2 Método B.

Se fabricaran dos probetas de impacto según las dimensiones establecidas en la figura 5.12. Estas dimensiones corresponden a las dictadas por ASTM A370, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. Estas serán utilizadas para el ensayo de impacto y examen metalográfico para la identificación de Fases Intermetálicas y medición de la tenacidad.

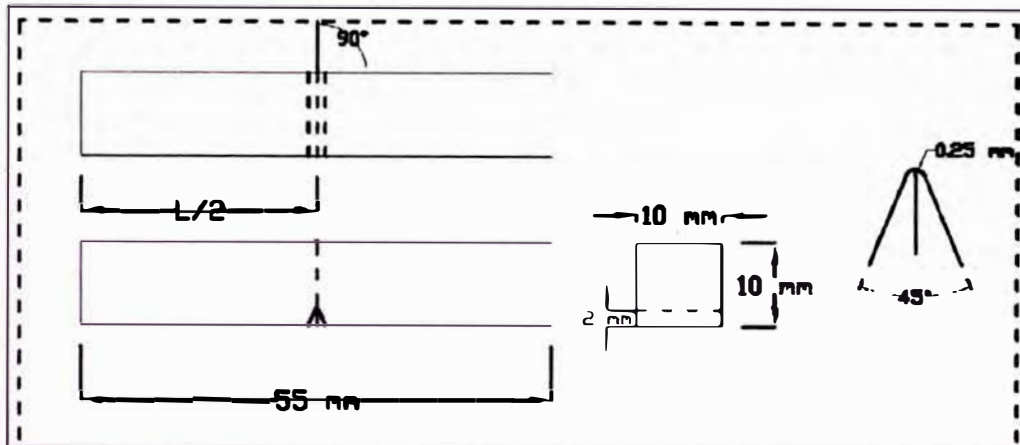


Figura 5.12 Dimensiones para probeta de Impacto.

Las variaciones permisibles a las dimensiones son como sigue:

Longitud de la entalla al borde	$90 \pm 2^\circ$
Lados adyacentes serán a	$90^\circ \pm 10 \text{ min}$
Dimensiones de sección transversal	$\pm 0.075 \text{ mm}$
Largo del espécimen (L)	$+ 0, - 2.5 \text{ mm}$
Centrado de la entalla (L/2)	$\pm 1 \text{ mm}$
Angulo de la entalla	$\pm 1^\circ$
Radio de la entalla	$\pm 0.025 \text{ mm}$
Profundidad de la entalla	$\pm 0.025 \text{ mm}$
Requisitos de acabado	2 μm en la superficie entallada y cara opuesta; 4 μm en las otras dos superficies.

Se tallaran a partir del cupón soldado No 2 tal como lo indica la figura 5.13, una con la entalla localizada enteramente en el metal soldado y la otra con la entalla ubicada en una zona que incluya la línea de fusión y zona afectada térmicamente.

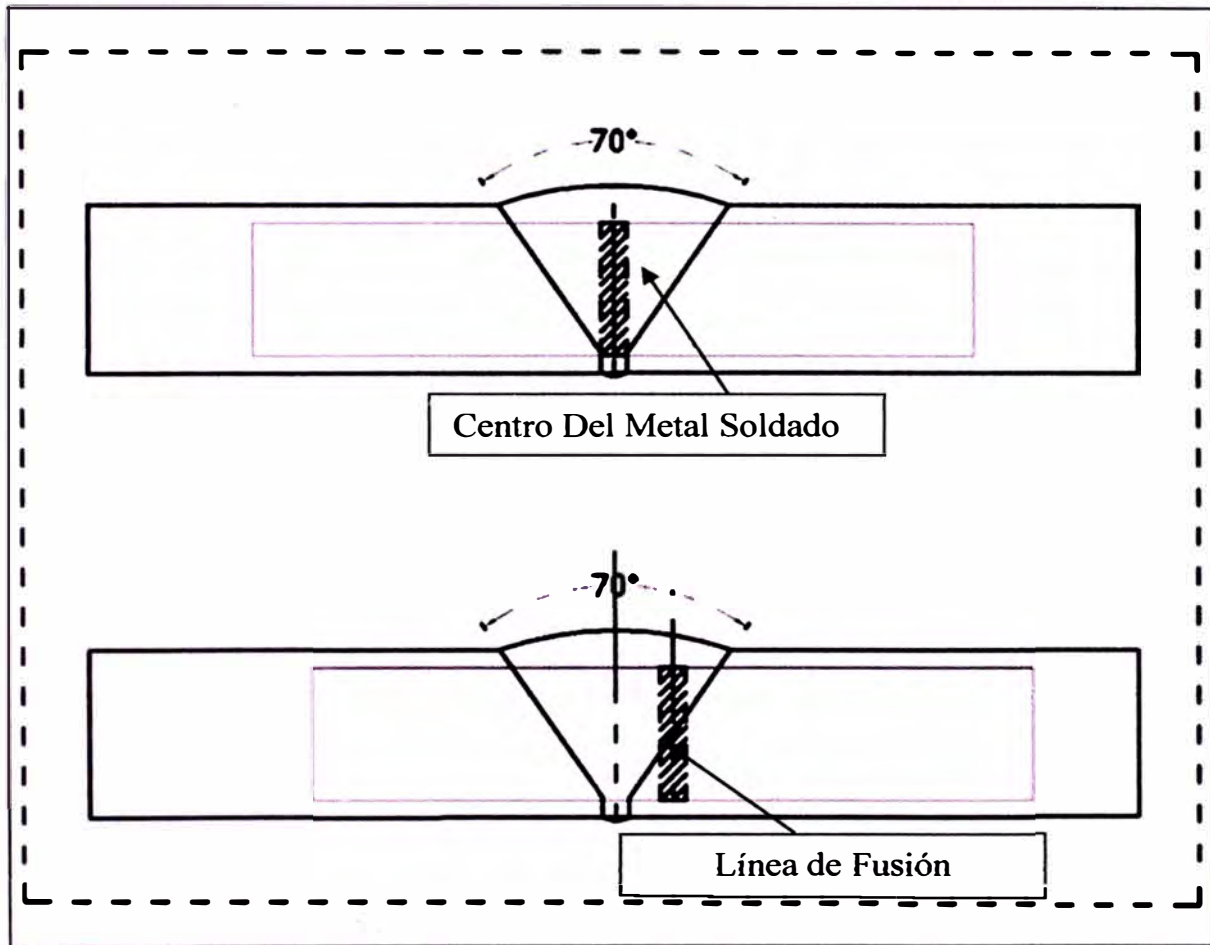


Figura 5.13 Ubicación de las probetas de ensayo de impacto (Como recomendación de A923 se requiere que la probeta incluya metal soldado, ZAT y metal base).

Criterio de Aceptación.

ASTM A923 nos indica los valores mínimos de energía de impacto que deben de tener los aceros inoxidable dúplex; tal como se indica en la tabla 5.4.

Tabla 5.4 Criterio de Aceptación según Método B – ASTM A913

TABLE 2 Applicability and Acceptance Criteria for Test Method B			
Grade	Condition	Test Temperature	Minimum Impact Energy ^A
S31803, S32205, J92205	base metal	-40°F (-40°C)	40 ft-lb (54 J) ^A
	heat-affected zone	-40°F (-40°C)	40 ft-lb (54 J) ^A
	weld metal	-40°F (-40°C)	25 ft-lb (34 J) ^A
S32750 J93404	base metal	-40°F (-40°C)	^B
	base metal	-50°F (-46°C)	40 ft-lb (54 J) ^A

^A Energy for a full-size specimen. Required energy for a subsize specimen is reduced in direct proportion to the reduced area of the subsize specimen relative to that of the full-size specimen.

^B The acceptable minimum impact energy shall be agreed upon by seller and purchaser.

Según la tabla para nuestro material UNS32205 se nos exige como mínimo una energía de impacto (a -40°C) de:

- Para el material base y la ZAC. → 54J.
- Para el metal de soldadura. → 34J.

CAPITULO 6

ANALISIS ECONOMICO

En lo que se refiere a los aspectos económicos, hoy en día todo el mundo busca la estabilidad. En proyectos de construcción a gran escala, la elección adecuada de materiales puede ahorrar mucho dinero. El acero inoxidable dúplex tiene una resistencia excepcional, lo que a menudo hace que una misma estructura se pueda construir con menos material. Por ejemplo, las paredes de los tanques pueden ser mucho más delgadas de lo que sería si se empleara un acero austenítico. Además el contenido en níquel del acero inoxidable duplex es mucho menor comparado con otros aceros con una resistencia a la corrosión similar. Esto significa que los precios de los duplex son más estables, hay menos sorpresas y los presupuestos son más fáciles de elaborar. En la figura 6.1 se ve algunas ventajas por la cual se debe emplear un acero dúplex UNS 32205.

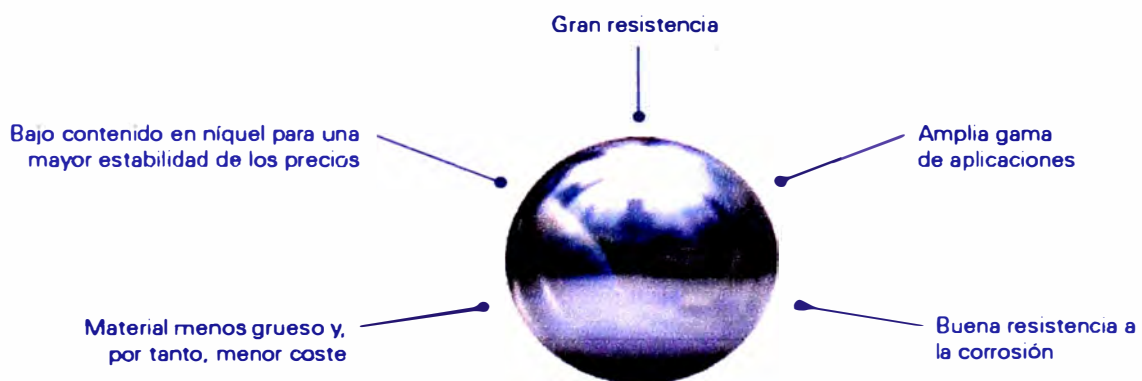


Figura 6.1 Ventajas Técnicas y económicas del acero dúplex 2205.

En pocas palabras, la ventaja del acero inoxidable dúplex desde el punto de vista económico reside en la reducción del peso; pues debido a su mayor resistencia se necesita menos material. Y como consecuencia de esto también menor cantidad de consumibles para el soldeo, menor gasto de transporte, menor gasto de fabricación, menor gasto de cimentación, menor gasto de montaje, etc.

En figura 6.2 se puede observar el ahorro potencial que se puede obtener al usar un acero inoxidable dúplex; estos valores pueden variar dependiendo de las clases que se comparan y el nivel de precios real.

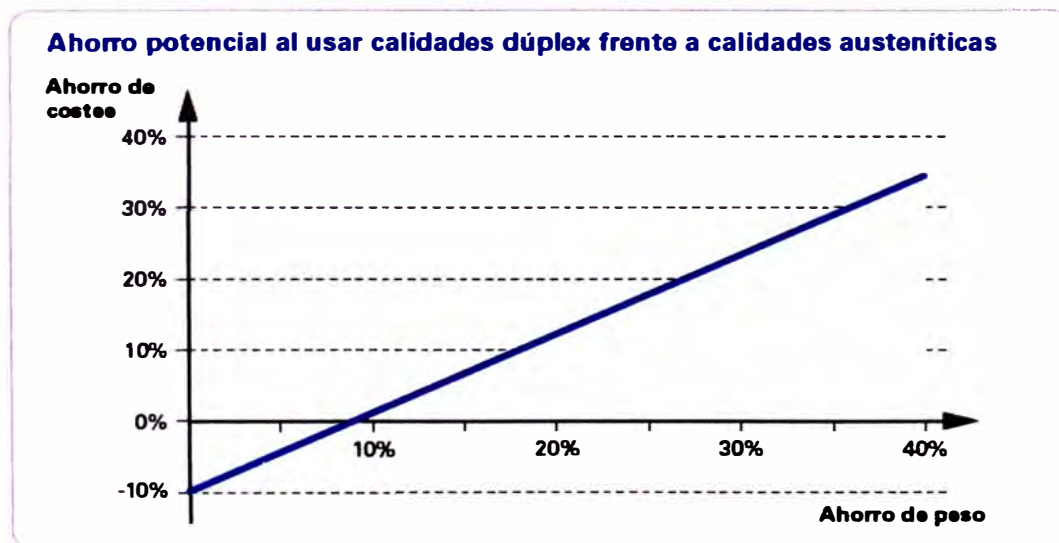


Figura 6.2 Ahorro en Peso vs Ahorro en Costo en un dúplex frente los aceros austeníticos.

Razón por la cual el presente trabajo busca promover el uso de este acero en nuestro país y para sintetizar se realizara un cálculo rápido para comparar los espesores de pared del cuerpo para un mismo tanque empleando un inoxidable 316L contra un UNS32205 y luego esto traducirlo a dinero.

6.1 CALCULO DE ESPESOR DE PARED CON ACERO 316L.

Para realizar este cálculo de manera rápida se está considerando las condiciones de servicio que se muestran en la tabla 6.1.

Tabla 6.1 Condiciones de Servicio para el diseño

Producto a Almacenar	Soda Caustica al 50%	
Descripción	Unidades	Cantidad
Densidad	Kg/M3	1520
Temperatura	°C	40
Volumen	M3	6280
Diámetro	M	20
Altura	M	20

Para calcular los espesores de pared usaremos la formula No 3.1.

El esfuerzo de diseño para los aceros austeniticos se encuentra en el Apéndice S del API 650 tal como se muestra en la tabla 6.2.

Tabla 6.2 Esfuerzo de diseño de los aceros inoxidable austeniticos según API 650 Apéndice S.

Table S-2a—(SI) Allowable Stresses for Tank Shells.

Type	Min. Yield MPa	Min. Tensile MPa	Allowable Stress (S_d) (in MPa) for Maximum Design Temperature Not Exceeding					S_y Ambient
			40°C	90°C	150°C	200°C	260°C	
201-1	260	515	155	136	125	121	--	234
201LN	310	655	197	172	153	145	143	279
304	205	515	155	155	140	128	121	186
304L	170	485	145	132	119	109	101	155
316	205	515	155	155	145	133	123	186
316L	170	485	145	131	117	107	99	155
317	205	515	155	155	145	133	123	186
317L	205	515	155	155	145	133	123	186

Notes:

- S_d may be interpolated between temperatures.
- The design stress shall be the lesser of 0.3 of the minimum tensile strength or 0.9 of the minimum yield strength. The factor of 0.9 of yield corresponds to a permanent strain of 0.10%. When a lower level of permanent strain is desired, the Purchaser shall specify a reduced yield factor in accordance with Table Y-2 of ASME Section II, Part D. The yield values at the different maximum design temperatures can be obtained from Tables S-5a.
- For dual-certified materials (e.g., ASTM A 182/A 182 Type 304L/304), use the allowable stress of the grade specified by the Purchaser.

Considerando un ancho de la plancha de 2 metros y una eficiencia de junta soldada de 1 ($E=1$); obtenemos los valores de los espesores de pared del cuerpo cilíndrico del tanque tal como se indica en la tabla 6.3.

Tabla 6.3 Calculo de espesor de cuerpo para 316L.

Nivel Anillo	D (m)	H (m)	G	Sd (Mpa)	t teorico (mm)	treal (mm)
1	20	20	1.52	145	20.23801379	21
2	20	18	1.52	145	18.1833931	19
3	20	16	1.52	145	16.12877241	17
4	20	14	1.52	145	14.07415172	15
5	20	12	1.52	145	12.01953103	13
6	20	10	1.52	145	9.964910345	10
7	20	8	1.52	145	7.910289655	8
8	20	6	1.52	145	5.855668966	6
9	20	4	1.52	145	3.801048276	6
10	20	2	1.52	145	1.746427586	6

En la tabla 6.3 notamos que los espesores teóricos en los niveles 9 y 10 debería corresponderle un espesor real de 4 y 2mm respectivamente; pero se le coloco 6mm que es el espesor mínimo que puede tener un tanque de estas dimensiones según recomendación de la Tabla No 3.2.

A continuación con los espesores obtenidos procedemos a calcular el peso del acero inoxidable 316L en función al volumen y la densidad de este; lo cual se desarrolló de la siguiente manera:

Calculo del desarrollo del cuerpo cilíndrico multiplicando el diámetro por π .

$$\text{Desarrollo} = D \times \pi \dots\dots\dots (6.1)$$

Luego con este valor calcularemos el área de cada anillo multiplicando el desarrollo por el ancho de cada anillo que en este caso es de 2 metros.

$$\text{Area} = \text{Desarrollo} \times \text{ancho} \dots \dots \dots (6.2)$$

Con los valores del área obtendremos el volumen de acero a emplear en cada anillo del tanque multiplicando el área por el espesor de cada anillo.

$$\text{Volumen} = \text{Area} \times \text{espesor} \dots \dots \dots (6.3)$$

Y por último calcularemos el peso de cada anillo con la siguiente relación

$$\text{Peso} = \frac{\text{Volumen}}{\text{Densidad}} \dots \dots \dots (6.4)$$

Donde la Densidad del acero es igual a 8100Kg/m³.

Los resultados obtenidos se muestran Tabla 6.4.

Tabla 6.4 Peso total del cuerpo del tanque empleando acero inoxidable austenítico 316L.

Nivel Anillo	D (m)	treal (mm)	Desarrollo (m)	Ancho (m)	Area (m ²)	Volumen (m ³)	Densidad (Kg/m ³)	Peso (Kg)
1	20	21	62.83032	2	125.66	2.6388734	8070	21295.71
2	20	19	62.83032	2	125.66	2.3875522	8070	19267.55
3	20	17	62.83032	2	125.66	2.1362309	8070	17239.38
4	20	15	62.83032	2	125.66	1.8849096	8070	15211.22
5	20	13	62.83032	2	125.66	1.6335883	8070	13183.06
6	20	10	62.83032	2	125.66	1.2566064	8070	10140.81
7	20	8	62.83032	2	125.66	1.0052851	8070	8112.651
8	20	6	62.83032	2	125.66	0.7539638	8070	6084.488
9	20	6	62.83032	2	125.66	0.7539638	8070	6084.488
10	20	6	62.83032	2	125.66	0.7539638	8070	6084.488
Peso Total (ton)								116.6
% Perdidas material								5.00%
Peso Total a usar (ton)								122.5

6.2 CALCULO DE ESPESOR DE PARED CON ACERO UNS 32205

Para realizar este cálculo de manera comparativa realizaremos el cálculo con las mismas condiciones de servicio mostrada en la tabla 6.1 y empleando el mismo método que en el caso anterior se obtiene los resultados de espesor de pared y peso del tanque mostrados en la tabla 6.5 y 6.6 respectivamente.

Tabla 6.5 Calculo de espesor de cuerpo para 2205.

Nivel Anillo	D (m)	H (m)	G	Sd (Mpa)	t teorico (mm)	treal (mm)
1	20	20	1.52	262	11.20042748	12
2	20	18	1.52	262	10.06332824	11
3	20	16	1.52	262	8.926229008	9
4	20	14	1.52	262	7.789129771	8
5	20	12	1.52	262	6.652030534	7
6	20	10	1.52	262	5.514931298	6
7	20	8	1.52	262	4.377832061	6
8	20	6	1.52	262	3.240732824	6
9	20	4	1.52	262	2.103633588	6
10	20	2	1.52	262	0.966534351	6

Tabla 6.6 Peso total del cuerpo del tanque empleando acero inoxidable dúplex 2205.

Nivel Anillo	D (m)	treal (mm)	Desarrollo (m)	Ancho (m)	Area (m2)	Volumen (m3)	Densidad (Kg/m3)	Peso (Kg)
1	20	12	62.83032	2	125.66	1.5079277	7800	11761.84
2	20	11	62.83032	2	125.66	1.382267	7800	10781.68
3	20	9	62.83032	2	125.66	1.1309458	7800	8821.377
4	20	8	62.83032	2	125.66	1.0052851	7800	7841.224
5	20	7	62.83032	2	125.66	0.8796245	7800	6861.071
6	20	6	62.83032	2	125.66	0.7539638	7800	5880.918
7	20	6	62.83032	2	125.66	0.7539638	7800	5880.918
8	20	6	62.83032	2	125.66	0.7539638	7800	5880.918
9	20	6	62.83032	2	125.66	0.7539638	7800	5880.918
10	20	6	62.83032	2	125.66	0.7539638	7800	5880.918
Peso Total (ton)								69.6
% Perdidas material								5.00%
Peso Total a usar (ton)								73.1

6.3 DIFERENCIAS ENTRE ESPESORES DE PARED.

Con los resultados obtenidos en las tablas 6.3 y 6.5 realizaremos una proyección del tanque tal como se muestra en la figura 6.3.

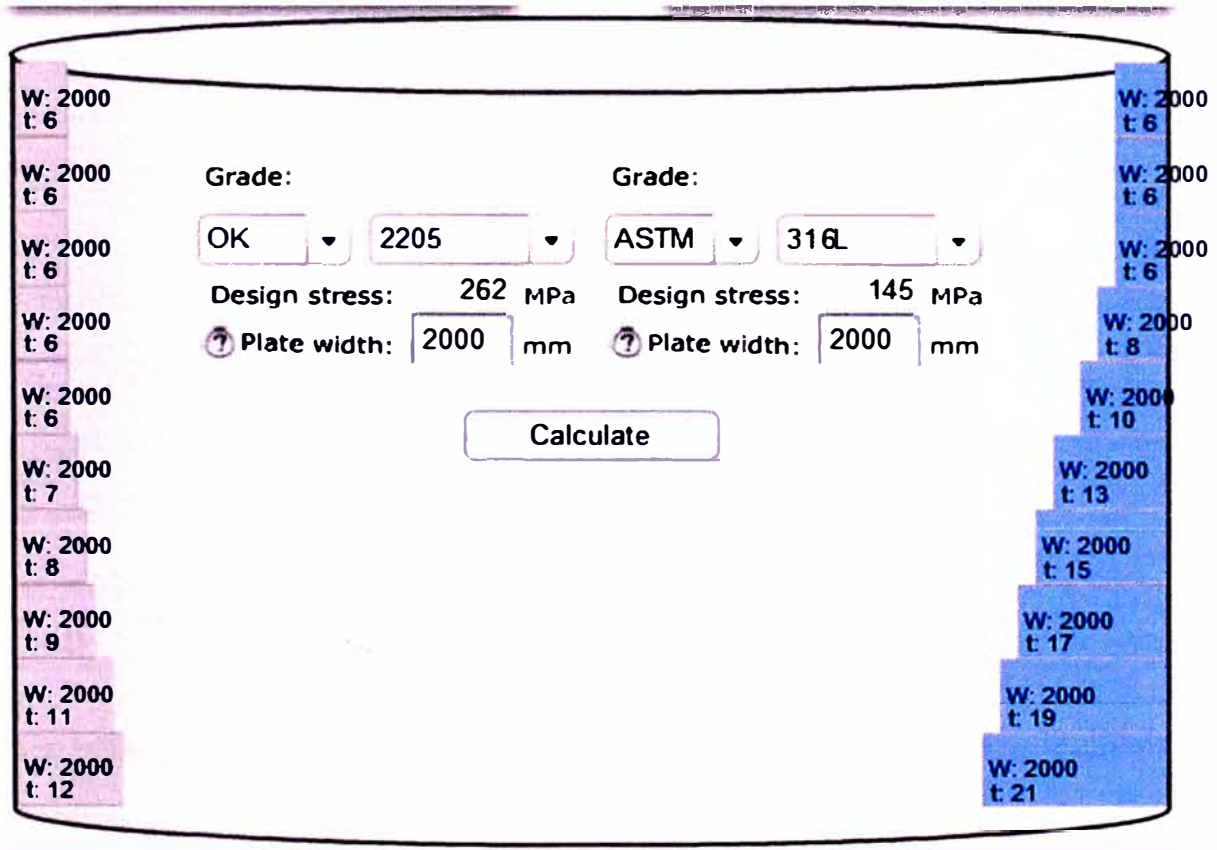


Figura 6.3 Comparación grafica de espesores de pared del tanque lado izquierdo empleando acero dúplex 2205 y derecho austenítico 316L.

Nota: Para realizar estos cálculos comparativos para diferentes valores de diámetro, altura y distintos tipo de material se puede aplicar una herramienta muy practica disponible en internet Steel professional tool at:

<http://tools.outokumpu.com/spt/storagegetank/storagegetanksnew.html>.

La diferencia en peso de material base según los resultados mostrados en la tabla 6.3 y 6.5 es de 49.4 TON; que representa una reducción en peso del 40%.

6.4 DIFERENCIA EN PESO Y PRECIOS.

La diferencia en peso de material base según los resultados mostrados en la tabla 6.4 y 6.6 es de 49.4 TON.

El precio por Kg. de estos materiales es casi igual; en la tabla 6.7 se muestra unos precios relativos entre aceros inoxidable austeníticos y dúplex según Outokumpu.

Tabla 6.7 El acero 2205 también denominado UNS31803 y el 316L tienen el mismo costo según Outokumpu.

Standard – Grade		Relative cost
ASTM	EN	
304	1.4301	100
316L	1.4432	150
S32304	1.4362	130
S31803	1.4462	150
–	1.4418	150

En la tabla 6.8 se muestran los precios actuales cotizados por las más importantes empresas de nuestro medio.

Tabla 6.8 Precios de los aceros dúplex y austeníticos en nuestro mercado

Plancha de Material	Proovedor	Precio \$/Kg
Duplex 2205	SANVIK DEL PERU	7.40
Austenítico 316L	POLIMETALES	6.45

En nuestro país actualmente se comercializa muy poco los aceros dúplex; debido a la poca demanda por el poco conocimiento de sus propiedades, es por ello que el precio del acero 2205 es ligeramente mayor al 316L; pero esta diferencia se compensa con el menor peso y con mejores propiedades anti corrosión.

Con los valores de peso de plancha necesaria para fabricar el cuerpo del tanque obtenido (tablas 6.3 y 6.5) y el precio de la plancha (tabla 6.7) obtendremos los costos de material base para cada caso, mostrado en la tabla 6.8.

Tabla 6.9 Diferencia en costo de material al emplear una plancha dúplex 2205 en lugar de 316L.

Plancha de Material	Precio \$/Kg	Peso (Kg)	Reduccion en Peso (Kg)	Reduccion en Peso (%)	Costo	Ahorro (\$)	Ahorro %
Duplex 2205	7.40	73100	49400	40%	540940.00	249185	31.54%
Austenitico 316L	6.45	122500			790125.00		

Tener presente que en este capítulo solo se hizo un análisis de costo del material base del cuerpo cilíndrico, pero con esta demostración queda claro que empleando aceros dúplex se consiguen ahorros económicos importantes por reducción en pesos y además de mejores propiedades contra la corrosión.

Para hacer un análisis de costo más preciso se debería incluir la reducción en peso del metal de aporte de soldadura, en la Tabla 6.9 se muestra de precios de los metales de aporte en nuestro mercado.

Tabla 6.10 Precios de metales de aporte para aceros dúplex y austeníticos en nuestro mercado

Metal de Aporte	Proveedor	Precio \$/Kg.	Para Soldar
E2209-16	SOLDEXSA	38.94	Duplex 2205
E316L-16	SOLDEXSA	31.20	Austenitico 316L

El costo global de fabricación del tanque en general se reduce aproximadamente 20% - 25% pues en el piso y en el techo la reducción de costos es negativa debido a que la diferencia en peso es casi mínima.

CONCLUSIONES

- Seleccionando adecuadamente los parámetros de soldeo según la secuencia establecida en el presente trabajo y realizando los ensayos de calificación recomendados se obtendrá un procedimiento de soldadura calificado; garantizando que durante la soldadura de producción de tanques de almacenamiento se obtendrán juntas soldadas sanas y de calidad.
- Para que la junta soldada tenga propiedades similares al material base debemos de tratar de obtener una microestructura equilibrada de austenita y ferrita (50%); esto lo podemos conseguir mediante el control del ciclo térmico y mediante el empleo de electrodos ricos en níquel y nitrógeno que son estabilizadores de la austenita.
- Para la calificación de los WPS de los aceros dúplex debemos de verificar que las propiedades mecánicas de la junta soldada son similares al metal base y además debemos descartar la presencia de fases intermetálicas que causan fragilización y pérdida de la resistencia a la corrosión de esta.
- Empleando acero dúplex 2205 en lugar de el austenítico 316L para la fabricación del cuerpo del tanque se consigue una reducción en peso de planchas de 40% lo cual se traduce en dinero en una reducción en costo de plancha del 31.54%, esta reducción en peso también origina reducción del costo de mano de obra, consumibles, transporte, montaje, etc. Y además se obtienen mejores propiedades contra la corrosión por lo cual resulta más beneficioso emplear el acero dúplex.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda emplear los aceros dúplex en reemplazo de los austeníticos convencionales por sus mejores propiedades frente a la corrosión y menores costos de fabricación; y además actualmente ya se dispone de estos materiales y sus consumibles en nuestro mercado.
- Si se desea obtener mayor reducción en costo para la aplicación descrita en este trabajo se recomienda emplear el acero dúplex equivalente en resistencia a la corrosión del acero 316L, que es el acero dúplex 2304 (ver figura No 2.3, 2.9 y 2.10); pues este material tiene un precio menor (ver tabla No 6.7).
- Si se está empleando acero austenítico 304L y se desea evolucionar hacia los dúplex se debe emplear el acero dúplex LDX 2101 que tiene una resistencia a la corrosión ligeramente mayor (ver figura 2.9), menor costo y mayor resistencia mecánica (ver tabla 3.4 y 6.2) lo cual implica reducción en peso.
- Para aplicaciones en la cual se hace indispensable mantener lo más alto posible la resistencia al impacto de la junta soldada se debe soldar con proceso de soldadura GTAW o TIG.
- Para mantener la resistencia a la corrosión de la junta soldada esta debe estar decapada y pasivada.

BIBLIOGRAFÍA

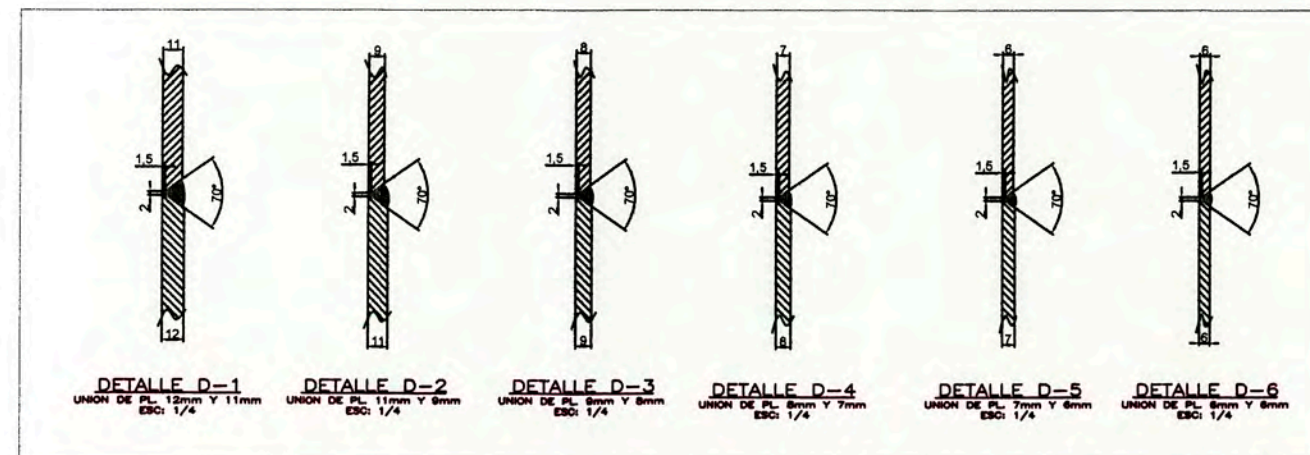
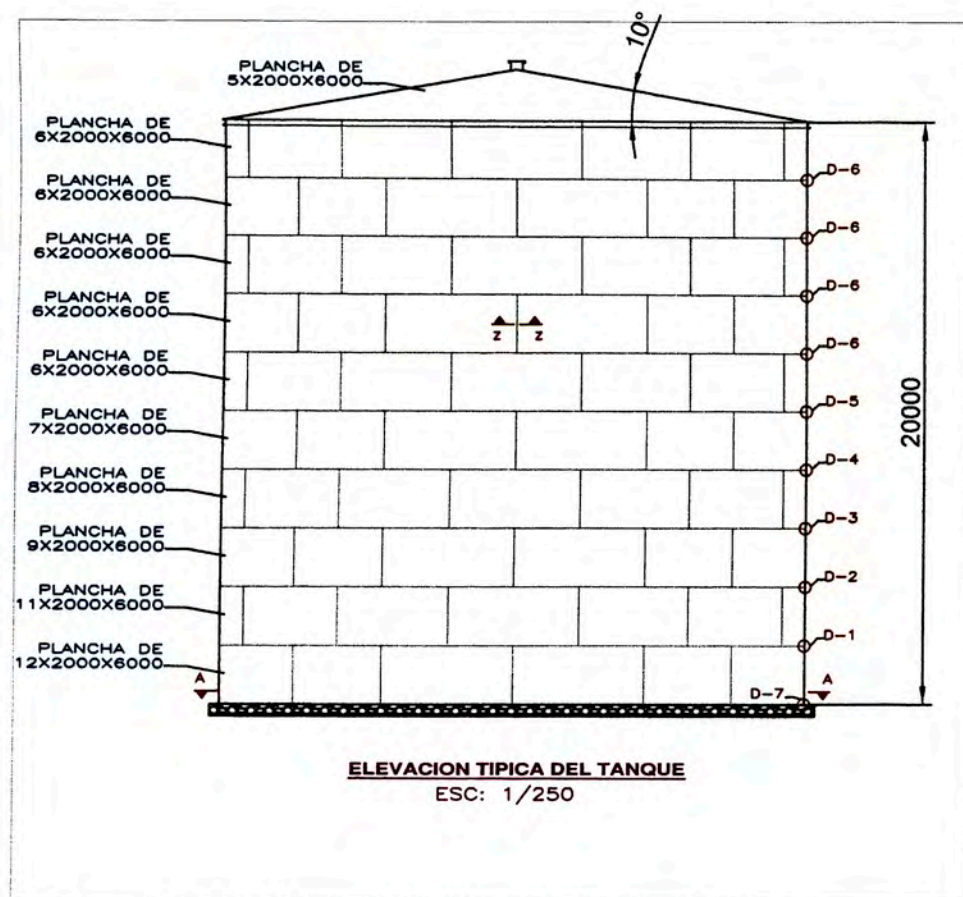
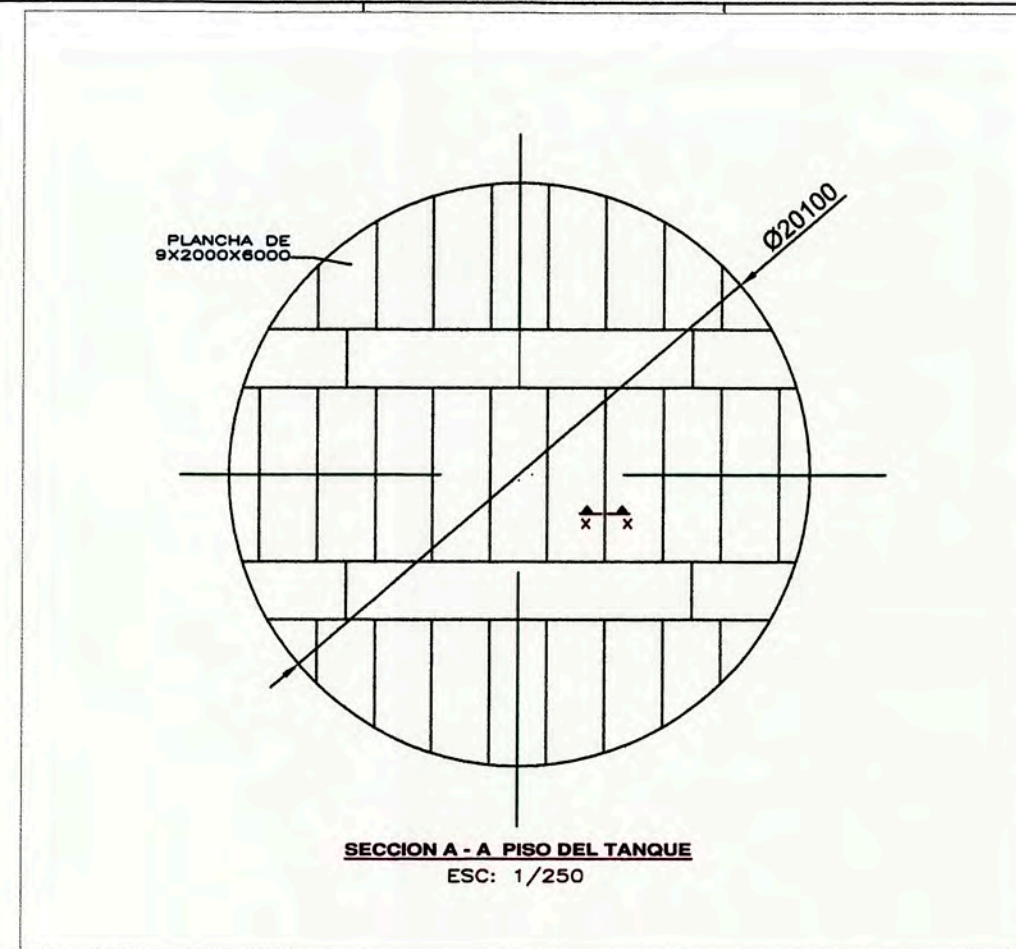
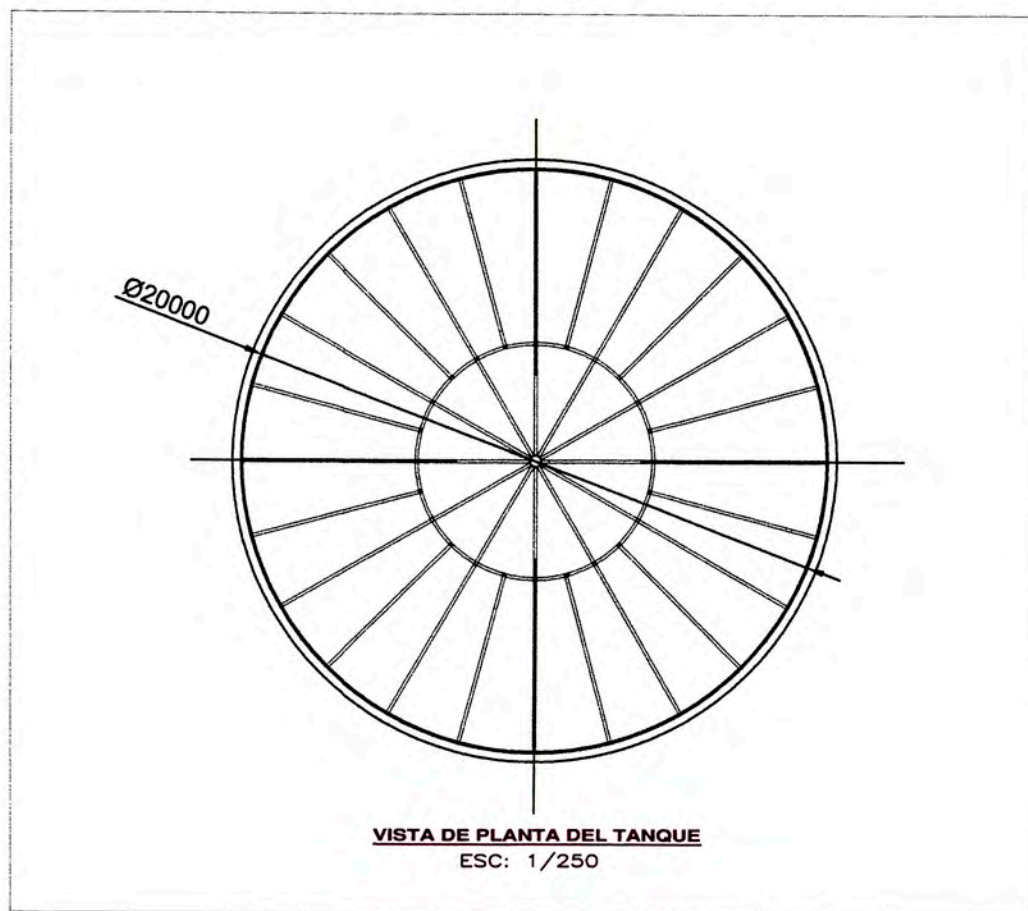
1. International Molybdenum Association. Guidelines for the fabrication of Duplex Stainless Steels. 2001.
2. Cesol. Aceros de Alta Aleación. Aceros Inoxidables. 2006
3. AVESTA WELDING. Como soldar aceros inoxidables dúplex. 2008.
4. OUTOKUMPU. Duplex Stainless Steel. Septiembre del 2010.
5. INDURA. Manual de Aceros Inoxidables. Marzo del 2010.
6. OUTOKUMPU. How to Weld Type 2205 Code Plus Two® Duplex Stainless Steel. Diciembre del 2004.
7. SANDVIK STEEL. Welding practice for the Sandvik duplex stainless steels SAF 2304, SAF 2205 and SAF 2507. Agosto de 1995.
8. Material de Estudio de la Maestría en Ingeniería de soldadura de la PUCP. Los Aceros Inoxidables Duplex. 2011.
9. ACOM de AVESTA POLARIT STAINLESS Utilizing High Strength Stainless Steel for Storage Tanks. 2003.
10. ROLLED ALLOYS. Data Sheet 2205 – UNS S32205 – UNS S31803. 2007.
11. Norma API 650 Welded Tanks for Oil Storage - Eleventh Edition. 2007.
12. Norma ASME SECCION IX Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators. 2010.
13. Norma ASTM A923-08 Standard Test Methods for Detecting Detrimental Intermetallic Phase in Duplex Austenitic/Ferritic Stainless Steels. 2008.

14. Norma ASTM A370-12, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. 2012.
15. Norma ASTM G48-11, Standard test methods for pitting and crevice corrosion resistance of stainless steels and related alloys by the use of ferric chloride solution. 2011.
16. Norma ASTM E340-00, Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys. 2006.
17. Norma EN ISO 6507-1, Metallic Materials - Vickers Hardness Test. 2005.
18. SOLDEXA. Hoja técnica de Electrodo Especial para Acero Inoxidable - EXSA 2209.
19. OUTOKUMPU. Materiales para Ideas Ganadoras. Noviembre del 2010.
20. <http://tools.outokumpu.com/spt/storage-tank/storage-tank-new.html>

ANEXOS

A continuación se muestra un plano de un Tanque de Almacenamiento de 6280M3; el cual será fabricado de planchas de acero inoxidable dúplex S32205 para el almacenamiento de Soda Caustica.

PLANO 01



NOTA: LAS PLANCHAS A EMPLEAR SON DE ACERO INOXIDABLE DUPLEX S32205

DIBUJO:	R. LEYVA	ESCALA:	PROYECTO:
DISÑO:	R. LEYVA	INDICADA	ALMACENAMIENTO DE SODA CAUSTICA
APROBO:	R. LEYVA	FECHA:	DESCRIPCION:
		NOVIEMBRE 2012	TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE SODA CAUSTICA DE 6280 M3
	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA	PLANO Nº:	QUIM-275-2012
	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	SUSTITUYE A:	
	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA	SUSTITUIDO POR:	
			REV. N°1