



**Universidad
Tecnológica
de Bolívar**

CARTAGENA DE INDIAS



**ACREDITADA
INSTITUCIONALMENTE**
Resolución MEN 1166 de 2011

Tesis de Grado
Mateo F. Guzmán Leguízamo
Enrique L. Nieto Calvo
Cartagena D. T. & C., Colombia, 2016

**EVALUACIÓN DE APTITUD PARA EL SERVICIO DEL TANQUE T2013 DE LA
EMPRESA MEXICHEM APLICANDO LA NORMA API 579-1/ASME FFS-1**

**MATEO FEDERICO GUZMÁN LEGUÍZAMO
ENRIQUE LUIS NIETO CALVO**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
CARTAGENA DE INDIAS D. T. & C.**

2016



**Universidad
Tecnológica
de Bolívar**
CARTAGENA DE INDIAS



Tesis de Grado
Mateo F. Guzmán Leguízamo
Enrique L. Nieto Calvo
Cartagena D. T. & C., Colombia, 2016

**EVALUACIÓN DE APTITUD PARA EL SERVICIO DEL TANQUE T2013 DE LA
EMPRESA MEXICHEM APLICANDO LA NORMA API 579-1/ASME FFS-1**

**MATEO FEDERICO GUZMÁN LEGUÍZAMO
ENRIQUE LUIS NIETO CALVO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

**DIRECTOR
PHD. LUIS MARCOS CASTELLANOS GONZÁLEZ**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
CARTAGENA DE INDIAS D. T. & C.**

2016



Cartagena, D. T. y C., 30 de junio de 2016

A quien interese,

Ciudad,

Los estudiantes **Mateo Federico Guzmán Leguízamo** y **Enrique Luis Nieto Calvo** identificados con las cédulas de ciudadanía **No. 1.082.992.643 de Santa Marta** y **1.047.485.498 de Cartagena**, respectivamente manifestamos en este documento la voluntad de ceder a la Universidad Tecnológica de Bolívar los derechos patrimoniales, consagrados en el artículo 72 de la Ley 23 de 1982 sobre Derechos de Autor, del trabajo final denominado **“EVALUACIÓN DE APTITUD PARA EL SERVICIO DEL TANQUE T2013 DE LA EMPRESA MEXICHEM APLICANDO LA NORMA API 579-1/ASME FFS-1”** producto de nuestra actividad académica para optar el título de **Ingeniero Mecánico** de la Universidad Tecnológica de Bolívar. La Universidad Tecnológica de Bolívar, entidad académica sin ánimo de lucro, queda por lo tanto facultada para ejercer plenamente los derechos anteriormente cedidos en su actividad ordinaria de investigación, docencia y extensión. La cesión otorgada se ajusta a lo que establece la Ley 23 de 1982. Con todo, en nuestra condición de autores reservamos los derechos morales de la obra antes citada con arreglo al artículo 30 de la Ley 23 de 1982. En concordancia suscribimos este documento que hace parte integral del trabajo antes mencionado y entregamos al Sistema de Bibliotecas de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

Atentamente,

Mateo Federico Guzmán Leguízamo
cc. 1.082.992.643 de Santa Marta

Enrique Luis Nieto Calvo
c.c. 1.047.485.498 de Cartagena



AGRADECIMIENTOS

“En primer lugar le agradezco a Dios por iluminar el camino.

También a mis padres Federico Antonio Guzmán Roa y Maria Consuelo Leguízamo Montalvo por el apoyo en cada uno de los pasos.

Finalmente, todo el personal humano que me acompañó, principalmente a el profesor Luis Marcos Castellanos que estuvo en función de tutor y padre en todo el proceso de formación y a la familia Yara Rojas por estar siempre presente” – Mateo Federico Guzmán Leguízamo.

“A la empresa Ingeniería y Ensayos del Caribe, en cabeza del Ingeniero Adolfo Ortiz, quienes dieron apoyo en materia de tutorías esenciales para el buen desarrollo del presente trabajo de grado. Paralelamente a la empresa MEXICHEM por la oportunidad brindada para la elaboración de esta tesis.

Al PhD. Luis Marcos Castellanos González, por ser más que un tutor, un padre y amigo en mi vida académica y personal. De usted aprendí el significado de trabajo duro y lealtad.

A mi madre Karla Calvo Pineda, por ser mi amiga, consejera espiritual y mentora de vida. Tus sacrificios no serán en vano.

A todos quienes han participado en mi formación como profesional, por su apoyo en los momentos difíciles. Los atesoro en mi mente y corazón.

A Dios Todopoderoso por permitirnos crecer como personas, mantenernos firmes ante el día adverso y darnos sustento en todo momento. Sin ti nada somos.” – Enrique Luis Nieto Calvo.



TABLA DE CONTENIDO

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
INTRODUCCIÓN	13
OBJETIVOS	15
OBJETIVO GENERAL	15
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
ESTADO DEL ARTE.....	16
Antecedentes de Investigación	16
Información de la Empresa	21
Razón Social	21
Descripción General de la Planta.....	21
Proceso Productivo de la Empresa	22
Tanques a Presión.....	23
Procesos de Fabricación de Tanques a Presión Cilíndricos	26
Materiales para la Fabricación de Tanques a Presión.....	28
Estados Tensionales	39
Esfuerzos Residuales por la Fabricación	43
Corrosión.....	47
Celda de Corrosión	48
Corrosión del Acero Inoxidable.	49
METODOLOGÍA API 579-1/ASME FFS-1	52
NIVELES DE EVALUACIÓN.....	55
METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN SEGÚN NIVEL 1 DE LA PARTE 9	57
RESULTADOS DEL TRABAJO.....	58
Inspección Visual	58
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	61
UTPA.....	61
EVALUACIÓN DE LA FALLA A TRAVÉS DE LA NORMA	68
EVALUACIÓN DE CONDICIONES GEOMÉTRICAS.....	68
CONDICIONES DE CARGA	71
PROPIEDADES DEL MATERIAL	71



EVALUACIÓN SEGÚN NIVEL 1 DE LA PARTE 9	71
CONCLUSIONES	79
RECOMENDACIONES	80
ANEXOS	82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88



TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Diagrama de Scheaffler.	35
Ilustración 2. Efecto de tracción simple.....	40
Ilustración 3. Efecto de compresión simple.....	40
Ilustración 4. Efecto de flexión simple.	41
Ilustración 5. Reacción de esfuerzo cortante.	42
Ilustración 6. Estado de una estructura al soportar pandeo.....	42
Ilustración 7. Edificio sometido a torsión.	43
Ilustración 8. Condiciones de esfuerzos residuales.....	44
Ilustración 9. Perfil de los esfuerzos residuales.	45
Ilustración 10. Ciclo de procesado del hierro en la producción de tuberías.	47
Ilustración 11. Celda de corrosión.	48
Ilustración 12. Agotamiento de cromo en los límites de grano (sensibilización).....	51
Ilustración 14. Longitud de la grieta. Método gráfico. (No a escala)	70



TABLA DE IMÁGENES

Imagen 1. Ataque de corrosión intergranular en el límite de grano.....	51
Imagen 2. Tanque T2013	58
Imagen 3. Problemas de corrosión en las uniones soldadas.	59
Imagen 4. Más problemas de corrosión en las uniones soldadas.....	59
Imagen 5. Defectos de soldadura detectados por medio de tintas penetrantes.	60
Imagen 6. Más problemas en las uniones soldadas detectados por medio de tintas penetrantes..	60
Imagen 7. Problemas detectados por inspección visual.....	61
Imagen 8. Representación gráfica del desarrollo del tanque.	62
Imagen 10. Defecto de la JT1, ubicado a partir de los 170°, a una profundidad de 6.68mm y con 200mm de Longitud. Inspeccionada desde el exterior.....	64
Imagen 11. Defecto a lo largo de toda la JT2, ubicado en la raíz. Inspeccionada desde el exterior.	64
Imagen 12. Defectos de la JT3, ubicados a 30°, 45° y 90° a profundidades y longitudes respectivamente de 4.2, 2 y 3 mm; 20, 100 y 120 mm.	64
Imagen 13. Defectos de la JT5, ubicados a 110°, 190° y 250° a profundidades y longitudes respectivamente de 6.98, 7.2 y 7.8 mm; 260, 150, 200mm	65
Imagen 14. Poros de la JT6, ubicados a 200° con profundidades de 6.3 y 7 mm. Esta junta no presenta uniformidad, es decir, al parecer una parte fue aplicada desde el exterior y otra desde el interior, por lo que registra socavaciones en toda su longitud alcanzando profundidades entre 3 y 4 mm.	65
Imagen 15. Defecto y poro de la JT7, ubicados a 180° y 240° a profundidades de 5.85 y 4.81 mm y con una longitud de 210mm ambas.	65
Imagen 16. Defectos de la JT8, ubicados a 180°, 220° y 250° a profundidades y longitudes respectivamente de 5, 8.18 y 5.51mm; 200, 130 y 210mm	66
Imagen 17. Defecto de la JL9, a una profundidad de 2.58 y una longitud de 140mm	66
Imagen 18. Defectos de la JL11, a profundidades de 4.8 y 5.38mm y longitudes de 130 y 200mm respectivamente.....	66
Imagen 19. Defecto de la JL12, en la raíz, con una longitud de 220mm.....	66



Universidad
Tecnológica
de Bolívar

CARTAGENA DE INDIAS



ACREDITADA
INSTITUCIONALMENTE

Resolución MEN 1166 de 2011

Tesis de Grado
Mateo F. Guzmán Leguízamo
Enrique L. Nieto Calvo
Cartagena D. T. & C., Colombia, 2016



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Antecedentes de Investigación.....	16
Tabla 2. Fallas comunes en los recipientes a Presión.	25
Tabla 3. Materiales de transición para electrodos.....	32
Tabla 4. Propiedades Mecánicas del acero AISI 304L.	71
Tabla 5. Esfuerzos de membrana y Factor de Seguridad en la zona de soldadura sin considerar variación del campo de esfuerzos por la presencia de grietas.	72

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Influencia de las propiedades físicas en la soldadura de aceros inoxidables austeníticos (ejemplo del AISI 304), comparados con el acero al carbono.....	30
Cuadro 2. Medidas de espesores (mm).....	63



PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1. Descripción del Problema

El tanque de despojo T-2013 de la empresa MEXICHEM ha presentado fugas del líquido almacenado el cual es una mezcla de acetato de vinilo, tricloro etileno, MVC y agua, donde éste último corresponde aproximadamente al 70% de la mezcla.

Esta falla es ocasionada por un indebido procesos de unión mecánica mediante soldadura de acero inoxidable 304L y acero negro ASTM-A7, lo cual ha ocasionado grietas y generado corrosión. La interacción de los fenómenos de agrietamiento, corrosión y esfuerzo (generado por la presión a la cual se almacena el fluido) genera el fenómeno conocido como Stress Corrosion Cracking (SCC), o corrosión asistida por esfuerzo.

La corrección de este problema debe hacerse de carácter urgente debido a las siguientes razones:

- a) Los fluidos contenidos en el tanque son altamente tóxicos, entre los cuales el MVC y el acetato de vinilo son unos de los más dañinos, pues poseen agentes cancerígenos. La ficha técnica de la empresa especifica que no debe exponer a 5 ppm de MVC y a 10 ppm de acetato de vinilo. Considerando las concentraciones presentes en la mezcla puede generar daños irreparables en aspectos tanto humanos (para los trabajadores), ambiental y económicos para la empresa por las multas ambientales.
- b) Los costos de remplazar un tanque hecho de acero inoxidable con las dimensiones que posee el T-2013 son muy altos.

Una alternativa viable para solucionar este problema es cambiar el método de unión de estos metales por unión a través de tensores, como se realizó en una reparación de uno de los anillos de soporte en acero negro. Con esto se evitan los problemas generados por la soldadura. Los problemas de corrosión cambian, pues podría ser atacado por corrosión por hendiduras o Crevice Corrosion, el cual puede ser solucionado empleando un polímero entre los anillos y el cuerpo del tanque. Se elimina de manera definitiva el SCC.



2. Formulación del Problema

¿Cómo presentar una propuesta de solución a la falla del tanque T-2013 a través de una normativa que permita evaluar la aptitud para el servicio del equipo en cuestión?



INTRODUCCIÓN

En el 2015 el tanque de despojo o “Blow Down” identificado como T2013 perteneciente a la Empresa Mexichem Resinas Colombia S. A. S. presentó fugas detectadas a través de inspección visual realizada por el ingeniero de planta. Se identificó que el equipo presenta daños por corrosión y agrietamiento.

El tanque es fabricado en acero austenítico 304L y soldado a anillos de soporte hechos en acero al carbono. Inicialmente el tanque T2013 fue utilizado como contenedor de Mono-vinil-cloruro (MVC) y vapor, durante esta etapa funcionó aislado térmicamente por su exterior. No se tiene el registro histórico de su cambio de función. Actualmente el tanque es usado como contenedor de líquidos de desechos de los procesos de la empresa sin aislamiento térmico exterior. El líquido del interior es una mezcla de acetato de vinilo, tricloro etileno, MVC y agua, donde éste último corresponde aproximadamente al 70% de la mezcla.

En evidencia de los daños detectados y considerando las posibles repercusiones que puede tener la fuga de los residuos (ambiental, económico y humano) la empresa solicita una evaluación de la aptitud para el servicio- Integridad Estructural - del tanque para tomar una decisión del tipo reparar o reemplazar el equipo.

Si bien no se conoce en su totalidad los registros históricos del equipo (*Data*), se toman en cuenta algunas consideraciones y supuestos lógicos de los procesos de fabricación y reparación. Todas los supuestos se basan en evidencias de la inspección. Luego se procede a analizar el equipo bajo el precepto de una normatividad que así lo permita.

La *American Petroleum Insitute* ofrece el standard API 579-1/ASME FFS-1 “*Fitness For Service*” el cual permite efectuar los estudios de aptitud para el servicio pertinentes para la situación problema mencionada y brindar solución a la misma¹. Por consiguiente se emplea esta normativa para la evaluación.

¹ Existen otras normativas que permiten abordar esta temática tales como la Australian Standard AS/NZS 3788:2006 o British Standard BS7910-2005. En este trabajo se optó por la norma API 579-1/ASME FFS-1 debido al auge de su uso actualmente por ser una norma de la *American Petroleum Insitute*.



El presente trabajo plantea una situación problema descrita al inicio de manera científica (PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA) donde se aborda principalmente el mal procedimiento de unión de materiales disimiles como lo son el acero austenítico 304L y el acero negro ASTM A7 por medio de soldadura en lugar de emplear métodos de uniones mecánicas como uniones por presión.

Paralelamente, hace una revisión del estado actual a nivel mundial de la teoría y cómo se abordan este tipo de situaciones problema (ESTADO DEL ARTE). En este punto se describen los procesos productivos de la empresa MEXICHEM, los procesos constructivos de los recipientes a presión (incluyendo técnicas, materiales, soldadura, corrosión, entre otros.) y se muestran los Antecedentes de Investigación para dar validez a la investigación.

A continuación se describen los procesos metodológicos de la normativa (METODOLOGÍA API 579-1/ASME FFS-1) los cuales se centran en la METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN SEGÚN NIVEL 1 DE LA PARTE 9.

Una vez conocida la metodología se procede a la aplicación de la misma a la situación estudio y se generan unos resultados con sus respectivos análisis (RESULTADOS DEL TRABAJO) los cuales serán útiles para brindar conclusiones del estudio que sean útiles para tomar una decisión a nivel empresa y se generan unas recomendaciones para prevenir posibles fallas a futuro según especifica la norma.



OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la aptitud para el servicio de un tanque que contiene residuos de los procesos de fabricación de resinas sometido a presión que presenta fallas por corrosión y grietas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Aplicar el procedimiento de la norma API 579-1/ASME FFS-1 “Fitness For Service” para la evaluación del equipo en estudio.
2. Presentar a la Empresa MEXICHEM propuesta(s) de solución para el caso problema en base al análisis de aptitud para el servicio.



ESTADO DEL ARTE

Antecedentes de Investigación

Tabla 1. Antecedentes de Investigación

Autor(es)	Localización	Título del trabajo	Resumen	Resultados	Criterio
(Sanzi, 2011)	Buenos Aires, Argentina	EVALUACION DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE UN COMPONENTE CONTENEDOR DE PRESION. APLICACIÓN DE LOS CODIGOS PARA EL DISEÑO Y SERVICIO ESTUDIO DE CASOS	En la investigación se tiene en cuenta que las que todos los elementos de trabajo ingenieril deben pasar por la aplicación de códigos tanto en su diseño como en su servicio. Tal es el caso de un contenedor a presión, el cual presenta fallas NO pasantes, y que su naturaleza superficial es un tiempo conveniente para realizar el estudio. Para un estudio efectivo se lleva a cabo análisis en el campo de la mecánica de la fractura y la mecánica de materiales, además del uso de un software de elementos finitos. En adición a lo anterior, para detectar la naturaleza de las fisuras se lleva a cabo ensayos no destructivos y emisión acústica.	Los resultados indican que el equipo presenta unos lineamientos de diseño que deben ser considerados. Posterior a ello se evalúan los 3 niveles de norma API 579. Los análisis de la falla no pasante se estructuran bajo resultados de técnicas NO destructivas, asegurando que en el equipo es improbable que exista falla con las condiciones actuales de trabajo, aunque se recomienda al equipo técnico a mantener un monitoreo.	ACEPTADO



(Jafari & Wickerson, 2012)	Texas, USA	FITNESS FOR SERVICE ASSESMENT FOR CRYSTALLIZERS WITH CRACK LIKE FLAWS	Los autores desarrollaron una evaluación de nivel 2 a un tanque cristalizador (Crystallizer vessel) catalogado como un equipo a presión con diámetro y espesor nominal de 102 in y 0,500 in respectivamente. El equipo presentaba SCC-C con grietas presentes principalmente en las uniones soldadas. Para la evaluación se desarrolló un modelado computacional a través de FEM, levantando la información del estado actual del equipo a través de ultrasonido de arreglo de fases (UTPA), inspección visual y tintas penetrantes.	El tanque es aceptado para seguir trabajando bajo el criterio de nivel 2 de la norma. En el momento de evaluación la máxima longitud de grieta registrada fue de 0,800". Además, la máxima profundidad de grieta registrada fue de 0,292". Se recomienda hacer una evaluación periodica de rutina con emisión acústica u otro método de inspección para controlar el crecimiento de la grieta.	ACEPTADO
(Nguyen & Beer, 2013)	Perth, Australia	Fitness-for-service and defect tolerance assessment – solutions for cracked components to remain in service	El paper hace un comparativo de las normas que emplean evaluaciones de aptitud para el servicio (Fitness For Service)/ o Evaluación de Tolerancia de Defecto (Defecto Tolerance Assessment), citando principalmente las normas AS/NZS 3788, BS7910, R5-R6 y API-579-1/ ASME FFS-1. Explicando cada una de las consideraciones que tienen en común, diferentes y las ecuaciones empleadas en cada norma. Se muestran unos casos de estudio donde se emplean las normas, siendo estas convergentes muchas ocasiones.	Como conclusión del trabajo se demuestra que la evaluación a través de estas metodologías son útiles para optimizar la vida de operación confiable segura de los equipos a presión de la industria, especialmente petroquímica.	-

(Saxon, 2013)	Cleveland, USA	MATERIAL SPECIFIC LOAD COMBINATION FACTORS FOR OPTION 2 FAD CURVES	El estudio evalúa la integridad de unos componentes que contiene fallas por agrietamiento, pero es necesario una metodología que define la combinación de efectos que son el resultados del esfuerzo primario y secundario. El estudio combina diagramas de prueba de la falla usando criterios de la central de generación de energía (CEGB) y el criterio estándar de la norma API 579	Al llevar acabo el estudio se encontró que el criterio desarrollado por Ainsworth es equivalente con el valor de la integral cerrada que está en la norma API 579, es por esto que dicho criterio puede ser adicionado en la norma. Además al usar la combinación de los factores de los esfuerzos primarios y secundarios se obtiene un resultado bastante ajustado a la realidad, siendo este un método poco conservativo (alto nivel en la norma API579)	-
(Lam, Sindelar, & Duncan, 2014)	California, USA	A FRAMEWORK TO DEVELOP FLAW ACCEPTANCE CRITERIA FOR STRUCTURAL INTEGRITY ASSESSMENT OF MULTIPURPOSE CANISTERS FOR EXTENDED STORAGE OF USED NUCLEAR FUEL	El trabajo muestra de manera conceptual la evaluación de un tanque de almacenamiento de combustible nuclear a través de la norma API-579-1/ ASME FFS-1. No muestra los resultados de los esfuerzos calculados a través de la teoría debido (posiblemente) a un acuerdo de confiabilidad, sin embargo muestra los arreglos de las uniones soldadas del acero austenítico empleado en el cuerpo del tanque y paralelamente indica que se efectúa una evaluación de nivel 3 debido a que el tanque en el momento de inspección no cumple con las condiciones geométricas necesarias para efectuar los niveles de evaluación 1 y 2.	No computa. Indica que el criterio de aceptación se basa en los resultados obtenidos en el diagrama FAD	-



(Herrera García, 2014)	Lima, Perú	Estudio de la Integridad Estructural de Tuberías Fisuradas Aplicando Simulación por Elementos Finitos en el Marco de la Norma API 579	El trabajo muestra el modo como al presentarse las fallas en los equipos se vuelve pertinente usar métodos de evaluación. Aclarando que la norma API 579 se ajusta más a aquellos equipos que están construidos bajo criterios como B31.3, ASME BPVC, entre otros, como es el caso específico de una tubería fisurada la cual se examina bajo el criterio API 579 y además se usa una evaluación con un software computacional de elementos finitos (MEF).	Con el criterio implementado con la norma API 579 se llevaron a cabo 2 niveles de análisis, en los cuales se usó criterios de mecánica de materiales y de la fractura. Estos resultados se ajustan a parámetros que dicta la norma con el cálculo del factor de intensidad de la fractura. Finalmente el criterio dicta que el equipo no fallaría sino hasta exponerse a 4 veces el valor de la presión actual de operación y un aumento en la temperatura de trabajo.	ACEPTADO
(Sindelar & Lam, 2015)	Massachusetts, USA	DEVELOPMENT OF FLAW ACCEPTANCE CRITERIA FOR AGING MANAGEMENT OF SPENT NUCLEAR FUEL MULTIPLE- PURPOSE CANISTERS	Se lleva a cabo un análisis de un frasco multipropósito el cual es cargado con desechos nucleares. El equipo además del daño presente por el contenido se degrada a mayor velocidad si se tiene en cuenta la exposición a medios agresivos. Se tiene un caso de corrosión bajo tensión el cual es iniciado en zonas de soldadura. El estudio se lleva a cabo siguiendo las intrucciones del diagrama para análisis de la falla presente en la norma API579 con el fin de demostrar que las zonas soldadas generan esfuerzos residuales perjudiciales. los resultados buscan poner un límite en la tolerancia de esta clase de equipos	El estudio concluye que aquellas zonas donde se realizó la soldadura representan zonas significativas para la proliferación de fallas, aunque sean de crecimiento gradual. Los porcentajes de crecimiento de grietas en estas zonas demuestran lo mucho que implica un buen procedimiento de soldadura y un posterior tratamiento térmico para la buena recuperación del material. Sin embargo, fueron necesarios más datos para llevar a cabo calculos propuestos en la	-



norma API 579, pero es
contundente que este tipo de
zonas no se pueden
despreciar, siendo crítico para
la elección de la geometría de
la soldadura e incluso datos
como voltage de trabajo.



Información de la Empresa²

Razón Social

Mexichem es un grupo mexicano de empresas químicas y petroquímicas que integra principalmente dos cadenas productivas: Cadena Cloro-Vinilo y Cadena de Flúor. Una de las empresas del grupo de Mexichem que participa en la cadena Cadena Cloro – Vinilo es Mexichem Resinas Vinílicas que cuenta con tres plantas industriales: dos en México y una en Cartagena, Colombia.

La planta de Cartagena fue adquirida a Petroquímica Colombiana en marzo de 2007 y está localizado en el complejo industrial de Mamonal donde se producen resinas de suspensión, emulsión y especialidades con una capacidad instalada de más de 400.000 toneladas anuales.

Descripción General de la Planta

Petroquímica Colombiana PETCO (Actualmente Mexichem Resinas de Colombia) ha estado produciendo una variedad de resinas de PVC desde 1965. Asentada en una extensión de terreno de aproximadamente de 29 hectáreas, la empresa posee una franja de 1 hectárea con orilla sobre la bahía de Cartagena.

Cuenta allí con las siguientes instalaciones industriales: 2 plantas de PVC de Suspensión, con capacidad para 295.000 toneladas por año de homopolímero, 5.000 de Copolímero y 1 una planta de PVC de Emulsión con 26.000 toneladas por año y una planta de compuesto (antiguamente llamada GEON).

² La información de la empresa es tomada de manera textual de (Pacheco & Palencia, 2008)



Proceso Productivo de la Empresa

La cadena de Cloro – Vinilo del grupo Mexichem produce resina de PVC que es el producto de la polimerización del monómero de cloruro de vinilo (MVC) a policloruro de vinilo (PVC). La resina que resulta de esta polimerización es la más versátil de la familia de los plásticos; pues además de ser termoplástica, a partir de ella se pueden obtener productos rígidos y flexibles. A partir de procesos de polimerización, se obtienen compuestos en forma de polvo pellet (Planta Compuestos – GEON-), plastisoles, soluciones y emulsiones.

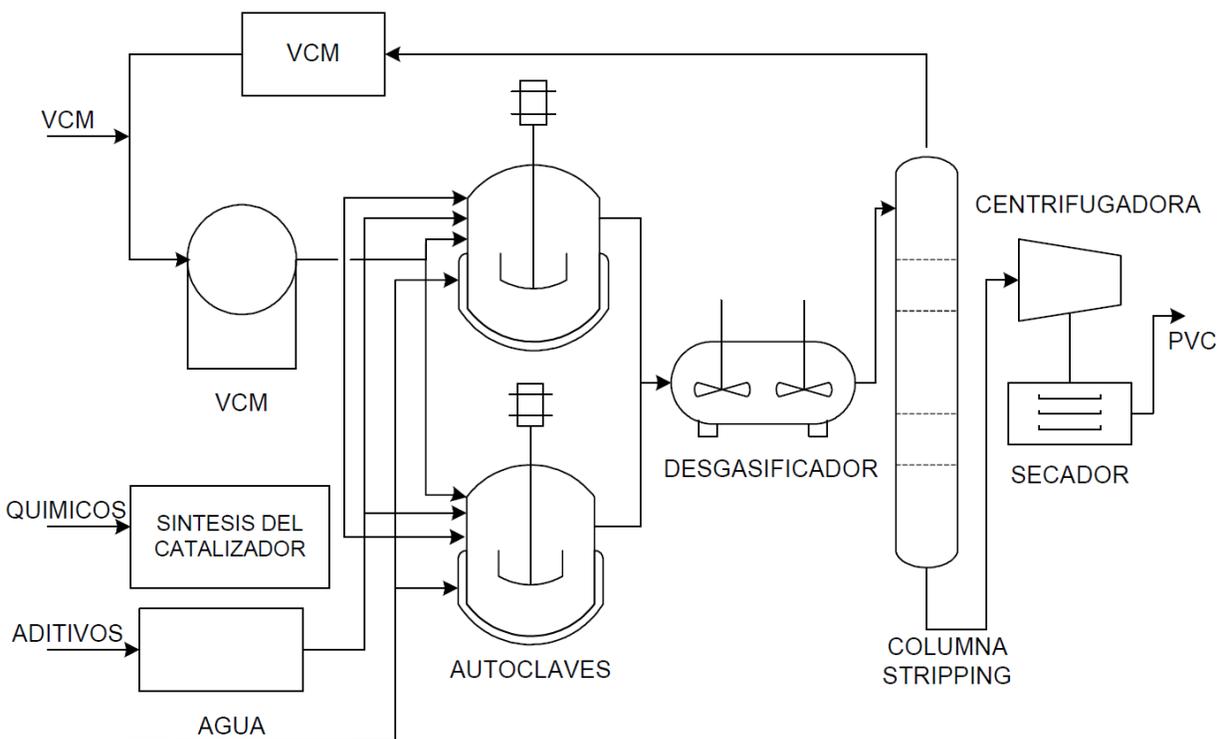
El proceso de suspensión se obtiene homopolímeros y copolímeros y es el más empleado, correspondiéndole cinco octavas partes del mercado total. El proceso se lleva a cabo en reactores de acero inoxidable con cargas de 15.000 kilogramos, en donde se emplean como agentes de suspensión la gelatina, los derivados celulósicos y el alcohol polivinílico, (iniciadores) en un medio acuoso de agua purificada, aireada o desmineralizada.

Después del final de la reacción (alrededor de 4 horas), se agotan los reactores y la mezcla de agua y PVC es separada del monómero no reaccionado. El PVC es centrifugado, secado y embalado. El agua es reciclada o tratada en la unidad de tratamiento de efluentes.

Como el MVC tiene propiedades tóxicas (Mexichem, 2008), es muy importante que no se lo libere para la atmósfera ni permanezca en el producto. Por eso, varias etapas del proceso y las características de los equipamientos donde ocurre, fueron concebidas para evitar tales pérdidas: esto asegura que las resinas contengan sistemáticamente menos que 1g de MVC por tonelada de PVC. Un esquema general del proceso de suspensión se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Obtención de PVC por suspensión en Solvay Martorell.



Tanques a Presión

Los tanques o depósitos a presión son contenedores diseñados para almacenar fluidos (gases o líquidos) a presiones mayores a la presión ambiental bien sea presión interna o presión externa.

La diferencia entre la condición de presión interior y exterior exige que los equipos sean diseñados, fabricados y operados bajo regulaciones y normas que garanticen su seguridad en operación. Además las condiciones de presión varían en cada lugar debido a su ubicación, características climáticas y presencia de cambio de estaciones (cambios térmicos). Debido a esto, el diseño debe soportar los efectos mencionados (Antonio, Basurto, & Gallegos, 2015).

Los tanques a presión para su diseño y construcción se clasifican según su **uso** y **geometría**.



Clasificación según su uso:

- **Tanques de Almacenamiento:** Bajo este parámetro los tanques funcionan como tanques o depósitos para contener una reserva de un producto.
- **Tanques de Procesos:** Deben cumplir con tareas tales como reactores, torres fraccionadoras, torres de destilación.

Clasificación según su Geometría:

- **Cilíndricos:** Estos elementos son de uso frecuente debido a su buen funcionamiento a nivel genérico pero con el fin de almacenar volúmenes relativamente bajos. Los tanques cilíndricos verticales son más comercializados, un ejemplo común son los tanques elevados.
- **Esféricos:** Los equipos esféricos se usan en la inmensa mayoría para almacenamiento y se recomienda para el uso de grandes volúmenes de fluidos a altas presiones.

Los tipos de fallas más comunes en los recipientes a presión son clasificados en la Tabla 2.



Tabla 2. Fallas comunes en los recipientes a Presión.

CATEGORÍA DE FALLAS	TIPO DE FALLAS	TIPO DE CARGAS
1. Material		Cargas Estables
2. Diseño	1. Deformación Elástica	a. Presión
3. Fabricación		b. Peso Propio
4. Servicio	2. Fractura por Fragilidad	c. Carga de viento
		d. Fluido
a. Letal	3. Deformación Plástica	e. Escaleras, Plataformas
b. Fatiga (cíclica)		f. Carga Térmica
c. Fragilidad	4. Inestabilidad Plástica	
d. Temperatura Elevada		Cargas Inestables
e. Elevado Choque o Vibración	5. Corrosión	a. Prueba Hidrostática
f. Contenido del Recipiente		b. Sísmica
		c. Transporte
1. Hidrógeno		d. Arranque y Paro de Equipo
2. Amoniaco		e. Carga Térmica
3. Aire Comprimido		f. Montaje
4. Sosa Cáustica		g. Emergencia
5. Cloruros		

Adaptado de: (Antonio et al., 2015)

Debido a que la probabilidad de falla siempre está presente, existen entes que brindan una normatividad para el control sobre estos equipos los cuales son: ASME, API, ISO 9001, ISO 9002 e ISO 9003.



Procesos de Fabricación de Tanques a Presión Cilíndricos

En general el proceso de fabricación de tanques a presión se deben seguir guías que brindan las normativas de construcción. Estas exigen un análisis desde el caso particular de cada necesidad del comprador del equipo, aunque estos también son conseguidos de modo “genérico”.

Sin embargo lo que realmente permite asegurar el buen funcionamiento de los recipientes es el estudio a través del diseño preliminar usando herramientas de simulación y siguiendo el criterio de las normativas.

Los procesos de fabricación de tanques a presión son similares en muchas de sus etapas, pero difieren en otras tales como las técnicas de unión, procesos de cortado, procesos de formado, entre otras. A continuación se explica el proceso de fabricación de tanques a presión cilíndricos (Guzmán, 2006).

Selección de Procesos y Sistemas de Control

Inicialmente la construcción se basa en una sección de procesos donde se analiza y simula la unidad en cuestión con el fin de determinar características. Al terminar la sección de procesos se procede a la sección de control, donde se define qué instrumentos son requeridos para mantener un control preciso del equipo, en este en este paso se establece la cantidad de válvulas, transductores de nivel, sistemas de alivio, entre otros elementos de control.

Diseño Mecánico

Una vez dados los límites de construcción de la unidad se pasa al cuerpo ingenieril para realizar un proceso de cálculos mecánicos los cuales permiten determinar dimensiones, cargas permisibles y definición de zonas críticas, además de los efectos que puede ejercer la presión.

Si se sigue el criterio de los códigos ASME -una de las más aplicadas a nivel mundial- una vez completada la sección de cálculos mecánicos se selecciona el material según el código ASME sección II.



Construcción

La construcción inicia con la obtención de la placa (de tamaño estandarizado) la cual será rolada, cortada y soldada bajo parámetros de control de calidad para entregar el producto esperado.

Rolado

El rolado se realiza con una roladora de 3 rodillos a muy baja velocidad para obtener la mayor uniformidad en la curvatura de la placa y evitar deteriorar el espesor necesario de la placa.

Soldadura

Culminado el proceso de rolado se realiza una soldadura longitudinal por arco sumergido que cierra las virolas y convierte el cuerpo en un cilindro, los cuales serán unidos entre sí por las juntas soldadas circunferenciales también por arco sumergido. Las uniones circunferenciales se hacen de tal modo que las soldaduras longitudinales no coincidan, esto le proporciona mayor rigidez e integridad a la estructura.

Cuidados En El Proceso

Cuando las planchas han estado almacenadas por un tiempo considerable se requiere de un precalentamiento antes de soldarlas, de este modo se asegura una unión uniforme con la calidad requerida. También se tiene en cuenta que al darle forma a un tanque con un diámetro muy grande se requiere colocar temporalmente estructuras que mantengan la rigidez en el interior del cuerpo para mantener la forma cilíndrica, sin esto se perdería redondez en el equipo.



Aberturas

Luego de haber obtenido el cuerpo se procede a realizar las aberturas del recipiente las cuales se ubican ya sea por procesos de instrumentación o control del equipo.

En ellas se ubican boquillas fabricadas de tubos sin costuras y se unen mediante procesos de soldadura en la brida específica para cada conexión, una vez ubicados se realiza un mecanizado cuidadoso con ayuda de un nivel para dejar una unión soldada de calidad.

Posteriormente se procede a instalar la cabeza elipsoidal, la cual se especifica según el espesor mínimo requerido en la sección más delgada del formado anterior. Estos cabezales se fabrican a partir de placas circulares planas que son sometidas a un proceso de formado en frío produciendo en su sección más delgada una depresión cóncava. Esta zona que representa la referencia para la selección del cabezal se elige en el proceso de diseño bajo los debidos cálculos.

El cabezal se une con un cordón de soldadura circunferencial en donde se colocan las aberturas necesarias para la instalación de las boquillas que se encuentren ubicadas en el cabezal.

Gestión De Calidad

Es importante resaltar que cada paso de decisión, procedimiento, metodología, se lleva a cabo bajo la debida documentación, las cuales se establecen por la gerencia de gestión de calidad con el código de normas ISO-9000 y el código ASME.

Materiales para la Fabricación de Tanques a Presión.

Para realizar la fabricación de esta clase de equipos se tienen como referencia las diferentes clases de acero, cada uno dando ciertas características según la necesidad, además se evalúan factores como costo, disponibilidad, y facilidad de formado.

- **Acero al carbono:** Es el material más disponible y económico. Muy bueno para casos donde no existan altas presiones o temperaturas.



- **Acero de baja aleación:** bajo elementos de aleación porcentaje de cromo y níquel, este tipo de acero es usado para requerimientos más específicos por lo que resultan más costosos que los fabricados de acero al carbono. No se consideran tan aptos para la resistencia a la corrosión, pero presentan mayores rangos de trabajo en la temperatura.
- **Aceros Inoxidables o de Alta Aleación:** Estos materiales presentan mayores costos, esto debido a poseer mayor porcentaje de aleación y por ende mayor resistencia a reacciones electroquímicas como la corrosión.
- **No ferrosos:** Esta clase de aceros se usan con el fin de contener elementos muy corrosivos lo cual permite la limpieza del equipo con diferentes tipos de elementos de especializados desinfectantes.

Como características generales los tanques deben soportar altos valores de tensión, tener buenas características de fluencia y mínima reducción de área. Se busca usar un material con un buen coeficiente de dilatación térmica. A nivel de resistencia química se busca un material capaz de soportar la corrosión, un material mal seleccionado será un gran costo para el fabricante.

El material debe ser de buena soldabilidad ya que su proceso de construcción es netamente soldado. Entre más elementos tenga el material del equipo es necesario mayor cuidado al proceso de post soldadura.

Aceros Inoxidables

Se considera acero inoxidable a la aleación Fe-Cr en la cual existe un porcentaje superior al 12% en peso de Cromo (Smith & Hashemi, 2006). Esta cantidad de Cromo en el material forma una capa de óxido de cromo en la superficie la cual impermeabiliza el hierro y lo hace resistente a la corrosión.

Los aceros inoxidables se clasifican en: aceros inoxidables austeníticos, aceros inoxidables ferríticos, aceros inoxidables martensíticos, y aceros inoxidables endurecibles por precipitación. Los aceros inoxidables austeníticos son los más resistentes a la corrosión de todos los aceros inoxidables y presentan unas combinaciones típicas de Cr-Ni de 18-8 y 25-20. La inclusión de Molibdeno evita la corrosión por picaduras en altas temperaturas (Shackelford, Güemes, & Comas,

2005).

Soldadura de Aceros Inoxidables

La soldadura es el proceso de unión de materiales mediante la aplicación de calor y/o presión en la cual las superficies de contacto garantizan la fusión de los materiales mediante la fundición de los mismos (Groover, 2007).

Los procesos de soldadura para materiales inoxidables se realizan bajo estrictas condiciones debido a que estos materiales son mayormente usados para la construcción de equipos para la industria química y la alimentaria (ACERIND S.C., n.d.). Algunas propiedades físicas que presenta el acero inoxidable ante el acero al carbono son las siguientes:

Cuadro 1. Influencia de las propiedades físicas en la soldadura de aceros inoxidables austeníticos (ejemplo del AISI 304), comparados con el acero al carbono.

	Aceros inoxidables austeníticos	Aceros al carbono	Observaciones
Punto de fusión (Tipo 304)	1400 - 1450 °C	1540 °C	El Tipo 304 requiere menos calor para producir la fusión, lo cual significa una soldadura más rápida para el mismo calor, o menos calor para la misma velocidad
Respuesta magnética	No magnético a todas las temperaturas ⁽¹⁾	Magnético hasta más de 705 °C	Los aceros inoxidables al níquel no están sujetos a la sopladura de arco
Velocidad de conductividad térmica A 100 °C A 650 °C	28% 66%	100 % 100%	El Tipo 304 conduce el calor mucho más lentamente que los aceros al carbono, lo cual produce gradientes de temperatura más pronunciados. Esto acelera la deformación. Una difusión más lenta del calor a través del metal de base significa que la zona soldada permanece caliente por más tiempo, resultado de lo cual puede ser una mayor precipitación de carburos, a menos que se usen medios artificiales para extraer el calor, tales como barras enfriadoras, etc
Resistencia Eléctrica (aleado) (microhm.cm, aprox.) a 20 °C a 885 °C	72.0 126.0	12.5 125	Esto es importante en los métodos de fusión eléctrica. La resistencia eléctrica más grande del tipo 304 resulta en la generación de más calor para la misma corriente, o la misma cantidad de calor con menos corriente, comparado con los aceros al carbono. Esta propiedad, junto con una menor velocidad de conductividad térmica, resulta en la efectividad de los métodos para soldadura por resistencia del Tipo 304
Expansión térmica en el rango indicado pulg./pulg. /°C x 10 ⁻⁶	17.6 (20 - 500 °C)	11.7 (20 - 628 °C)	El tipo 304 se expande y contrae a una velocidad más alta que el acero al carbono, lo cual significa que se debe permitir expansión y contracción a fin de controlar la deformación y el desarrollo de tensiones térmicas después del enfriamiento. Por ejemplo, para el acero inoxidable deben usarse más puntos de soldadura que para el acero al carbono

Fuente: <http://www.cientificosaficionados.com/libros/solinox1.pdf>

- **Soldadura por arco de metal protegido:** Es un proceso versátil, ampliamente utilizado para la soldadura del acero inoxidable, cuando los tamaños o cantidades no justifican la



soldadura automática. El electrodo es un alambre sólido recubierto con una capa de decapante extruido, aunque algunos fabricantes utilizan un alambre hueco.

La soldadura se lleva a cabo manualmente con el soldador manteniendo control sobre la longitud del arco y dirigiéndolo hacia la junta a soldar. El recubrimiento del electrodo tiene estas funciones: la cubierta exterior de decapante no se quema tan rápido como el alambre del electrodo, lo cual ayuda a controlar la acción del arco y permite soldar en varias posiciones; El recubrimiento gaseoso de la descomposición del decapante excluye al oxígeno y nitrógeno del metal fundido; La escoria fundida que se forma sobre la soldadura protege al metal de la contaminación atmosférica y ayuda a dar forma al cordón de soldadura.

El electrodo se selecciona según el material que se va a soldar, con esto se evitan cambios bruscos de material. La siguiente figura indica como escoger el material del electrodo según el material a soldar.



Tabla 3. Materiales de transición para electrodos.

Materiales de aporte sugeridos para la soldadura del acero inoxidable					
Metal de base	Electrodo recubierto AWS o nombre común	Electrodo desnudo y varilla - AWS o nombre común	Metal de base	Electrodo recubierto AWS o nombre común	Electrodo desnudo y varilla - AWS o nombre común
AISI (UNS)	AWS A5.4 (UNS)	AWS A 5.9 (UNS)	AISI (UNS)	AWS A5.4 (UNS)	AWS A 5.9 (UNS)
304 (S30400)	E 308 ⁽¹⁾ (W30810)	ER 308 ⁽¹⁾ (S30880)	20 MO-6 ⁽²⁾ (N08026)	(3)	(3)
304L (S30403)	E 308L (W30813)	ER 308L (S30883)	20Cb-3 ⁽²⁾ (N08020)	E 320LR (W88022)	ER 320LR (N08022)
309 (S30900)	E 309 ⁽¹⁾ (W30910)	ER 309 ⁽¹⁾ (S30980)	FUNDICIONES		
310 (S31000)	E 310 (W31010)	ER 310 (S31080)	TIPO ACI (UNS)	AWS A 5.4 (UNS)	AWS A 5.9 (UNS)
316 (S31600)	E 316 ⁽¹⁾ (W31610)	ER 316 ⁽¹⁾ (S31680)	CF-8 (J92600)	E 308 ⁽¹⁾ (W30810)	ER 308 ⁽¹⁾ (S30880)
316L (S31603)	E 316L (W31613)	ER 316L (S31683)	CF-3 (J92500)	E 308L (W30813)	ER 308L (S30883)
317 (S31700)	E 317 ⁽¹⁾ (S31780)	ER 317 ⁽¹⁾ (S31780)	CF-8M (J92900)	E 316 ⁽¹⁾ (W31610)	ER 316 ⁽¹⁾ (S31680)
317L (S31703)	E 317L (W31713)	ER 317L (S31783)	CF-3M (J92800)	E 316L (W31613)	ER 316L (S31683)
317 LM (S31725)	(3)	(3)	CN-7M (J95150)	E 320 LR (W88022)	ER 320 LR (N08022)
321 (S32100)	E 347 (W34710)	ER 321 (S52180)	CK-3Mcu (S32154)	(3)	(3)
347 (S34700)	E 347 (W34710)	ER 347 (S34780)	CA-6NM (J91540)	E 410 NiMo (W41016)	ER 410 NiMo (S41086)
Aleación 904L (N08904)	(3)	(3)	Notas:		
Aleación 254 SMO ⁽²⁾ (S31254)	(3)	(3)	(1) La "L" o grado bajo en carbono o un grado estabilizado se usa siempre para una construcción soldada, excepto en algunas pocas instancias donde es más importante una dureza un poco mayor que una mejor resistencia a la corrosión.		
AL-6XN ⁽²⁾ (N08367)	(3)	(3)	(2) Nombre comercial		
1925 hMo ⁽²⁾ (N08926)	(3)	(3)	(3) Para soldar estos aceros inoxidables se usa normalmente un metal de aporte con 9% o más de molibdeno, tales como los dos listados abajo		
25-6 Mo ⁽²⁾ (N08926)	(3)	(3)	Electrodo recubierto AWS A5.11 (UNS)	Electrodo desnudo y varilla AWS 5.14 (UNS)	

Fuente: <http://www.cientificosaficionados.com/libros/solinox1.pdf>

- **Soldadura TIG (Tungsten Inert Gas):** Es un proceso en el cual se usa un gas inerte para proteger del aire al metal. La estructura del escudo gaseoso puede ser a base de argón puro, helio o mezclas de estos gases. Las mezclas de argón con oxígeno que se usan en la



soldadura MIG no deben ser usados en la TIG, debido al rápido deterioro de los electrodos de tungsteno. Las adiciones de nitrógeno no se recomiendan por la misma razón.

Aceros Inoxidables Austeníticos

Estos son los aceros inoxidables al cromo-níquel (tipo 3XX) y al cromo-níquel manganeso (tipo 2XX). Son esencialmente no magnéticos en la condición de recocido y no endurecen por tratamiento térmico. El contenido total de níquel y cromo es de por lo menos 23%. Se pueden trabajar fácilmente en caliente o en frío. El trabajo en frío les desarrolla una amplia variedad de propiedades mecánicas y, en esta condición, el acero puede llegar a ser ligeramente magnético. Son muy resistentes al impacto y difíciles de maquinar. Estos aceros tienen la mejor resistencia a altas temperaturas y resistencia a la formación de escamas de todos los demás aceros inoxidables. Su resistencia a la corrosión suele ser mejor que la de los aceros martensíticos o ferríticos.

Acero AISI 304 y 304L

El acero 304 es considerado uno de los aceros inoxidables básicos (Brown Mc Falarne, n.d.), su nomenclatura indica que posee tres elementos aleantes los cuales son Cromo, Níquel y Molibdeno, además su variante 304L posee un bajo porcentaje de carbono cercano al 0,03% (*Low Carbon Stainless Steel*).

La composición química de este acero es de Mn <2.00, Si <1.00, 18 < Cr <20, 8 < Ni <12, P < 0.045 y S <0.03 (ver Anexo 1). Estos aceros son de fácil formado, soldado, fabricado y una buena resistencia ante la corrosión, gracias a esto se usan ampliamente en la industria alimenticia. Cabe resaltar que la reducción de la cantidad de carbono en el 304L disminuye su resistencia mecánica.



Soldabilidad de los Aceros Inoxidables Austeníticos

El mayor inconveniente que presenta la soldadura de los aceros austeníticos es la precipitación de carburos que pueden producirse en las zonas cercanas al cordón de soldadura, quedando sensibilizados a la corrosión intergranular. Para evitar esta precipitación se deben soldar las piezas sin precalentamiento y con el menor aporte de calor posible. Otra posibilidad es emplear aceros austeníticos con porcentaje de carbono menor a 0.03% o aceros austeníticos estabilizados con titanio, niobio o tántalo.

Para una correcta selección de materiales de aporte entre aceros ya sean al carbono o inoxidables se debe cumplir con la ley fundamental: el metal de aporte para una soldadura debe ser de igual o mayor aleación al metal base. Siguiendo este parámetro usa el diagrama de Schaeffler, de la siguiente manera.

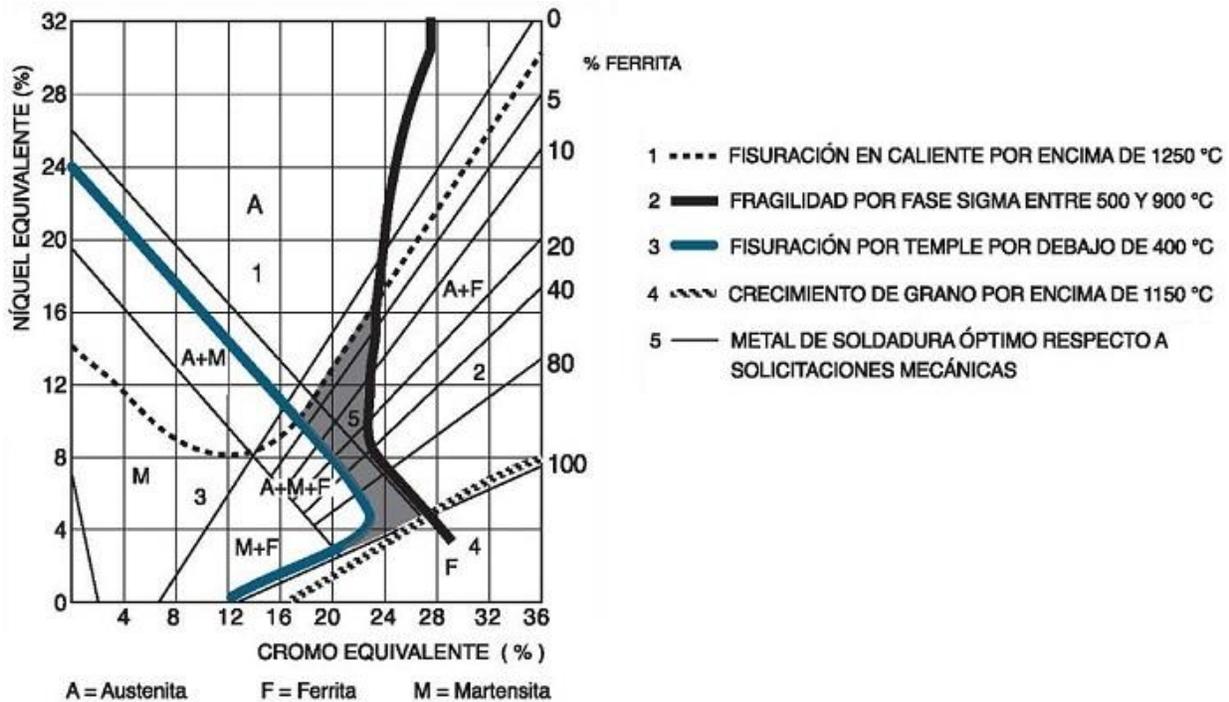
Diagrama de Schaeffler: El diagrama de Schaeffler se usa principalmente para predecir la estructura del metal de soldadura obtenido en la unión de aceros inoxidables disímiles, o de aceros inoxidables con aceros al carbono, con o sin aleación. Este diagrama fue obtenido por Al Schaeffler de manera empírica y permite determinar la estructura de un metal conociendo su composición.

Este diagrama es válido únicamente cuando los elementos se encuentran en proporciones no mayores a: C máx. 0.2%, Mn máx. 1.0%, Si máx. 1.0%, Mo máx. 3.0%, Nb máx. 1.5%.

Adicionalmente se indican problemas que presentan determinadas estructuras al soldar, dependiendo de su ubicación en el diagrama, que pueden evitarse al seleccionar adecuadamente el metal de aporte y el procedimiento de soldadura.



Ilustración 1. Diagrama de Scheaffler.



Fuente: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/objetos/figutut48/fig7tut48.jpg>

Recomendaciones para Soldar Acero Inoxidable

Las recomendaciones dadas por el catálogo de INDURA (2010) brindan las siguientes pautas para la soldabilidad de los aceros inoxidables.

- I. **Precalentamiento:** Precalentar el metal base puede llevar a efectos no deseados como fisuras en caliente, distorsiones y/o precipitación de carburos de cromo en los límites de grano, lo cual reduce su resistencia a la corrosión. Por tanto precalentar no es recomendable.
- II. **Metal de aporte:** Debe ser de características compatibles con la resistencia a la corrosión, resistencia mecánica y tenacidad, es común el uso de electrodos de AISI 308L.
- III. **Temperatura:** Mantener la temperatura del metal base lo más baja posible, aproximadamente 70°C.



IV. **Tratamientos térmicos:** Este tipo de acero usualmente viene tratado térmicamente por temple por disolución, el cual consiste en calentar la aleación a temperaturas entre 1040°C y 1175°C (dependiendo de la aleación) y enfriar rápidamente –usualmente en agua- para diluir los carburos de cromo, y obtener carbono y cromo en soluciones sólidas. Sin embargo muchas veces este proceso puede ocasionar altas tensiones residuales las cuales podrían afectar el maquinado de piezas, para aliviar tensiones se recomienda:

1. **Aliviar tensiones a baja temperatura (De 350°C a 425°C):** Este proceso elimina únicamente los picos de tensiones, esta es la más recomendable dado que no se presenta la temperatura suficiente para la formación significativa de carburos de cromo.
2. **Aliviar tensiones a temperatura media (De 425°C a 925°C):** Los aceros que se calienten en este intervalo de temperatura perderán parte de su resistencia a la corrosión, cuando este tratamiento sea necesario se recomienda utilizar aceros en un grado estabilizado o con bajo contenido de carbono.

Defectos de Soldadura de Aceros Inoxidables

- **Socavamiento:** Este término describe:
 1. La eliminación por fusión de la pared de una ranura de soldadura en el borde de una capa o cordón, con la formación de una depresión marcada en la pared lateral en la zona a la que debe unirse por fusión la siguiente capa o cordón.
 2. La reducción de espesor en el metal base, en la línea en la que se unió por fusión el último cordón de la superficie.

El socavamiento - Figura 2 (a) - en ambos casos se debe a la técnica empleada por el operador. Ciertos electrodos, una corriente demasiado alta, o un arco demasiado largo, pueden aumentar la tendencia al socavamiento.



- **Agrietamiento:**

El agrietamiento de las juntas soldadas - Figura 2 (b) - ocurre por la presencia de esfuerzos multidireccionales localizados que en algún punto rebasan la resistencia máxima del metal. Cuando se abren grietas durante la soldadura o como resultado de ésta, generalmente solo es aparente una ligera de la pieza de trabajo.

Después que se ha enfriado una junta soldada, hay más probabilidades de que ocurra agrietamiento cuando el material es duro o frágil. Un material dúctil soporta concentraciones de esfuerzo que pudieran ocasionar falla en un material duro o frágil.

Agrietamiento del metal de la soldadura: El agrietamiento del metal de la soldadura tiene más probabilidades de ocurrir en la primera capa de soldadura que en cualquier otra parte, y de no repararse continuará pasando a las demás capas al ir siendo depositadas. Esta tendencia de continuar hacia las demás capas sucesivas se reduce considerablemente, o se elimina, con metal de soldadura austenítico. Cuando se encuentra el problema de agrietamiento de la primera capa de metal de la soldadura, pueden lograrse mejoras aplicando uno o más de las siguientes modificaciones:

- Modificar la manipulación de electrodo o las condiciones eléctricas, lo que cambiará el contorno o la composición del depósito.
- Disminuir la rapidez de avance, para aumentar el espesor del depósito, aportando con ello más metal de soldadura para resistir los esfuerzos que están generando.
- Auxiliarse con precalentamientos, para modificar la intensidad del sistema de esfuerzos que está imponiendo.

- **Porosidad:**

Las porosidades - Figura 2 (c) - son los huecos globulares, libre de todo material sólido, que se encuentra con frecuencia en los cordones de soldadura. En realidad, los huecos son de una forma de inclusión que resulta de las reacciones químicas que tienen lugar durante



la aplicación de la soldadura. Difieren de las inclusiones de escoria en que contienen gases y no materia sólida.

Los gases que forman los huecos se derivan de los gases liberados por el enfriamiento del metal de la soldadura, como consecuencia de la reducción de solubilidad al descender la temperatura y de las reacciones químicas que tienen lugar dentro de la propia soldadura.

- **Inclusiones no metálicas:**

Las inclusiones no metálicas - Figura 2 (d) - son los óxidos no metálicos que se encuentran a veces en forma de inclusiones alargadas y globulares en los cordones de soldadura. Durante la formación del depósito y la subsecuente solidificación del metal de la soldadura, tienen lugar muchas reacciones químicas entre los materiales (fundente), o con la escoria producida. Algunos de los productos de dichas reacciones son compuestos no metálicos, solubles solo en cierto grado en el metal fundido. Debido a su menor densidad, tienden a buscar la superficie exterior del metal fundido, salvo que encuentren restricciones para ello.

- **Penetración incompleta**

Esta expresión se usa para describir la situación en que el metal depositado y el metal base no se funden en forma integral en la raíz de la soldadura.

Falta de Fusión: La falta de fusión - Figura 2 (e) - es ocasionada debido a que la cara de la raíz de la soldadura de ranura no alcance la temperatura de fusión a toda su altura.

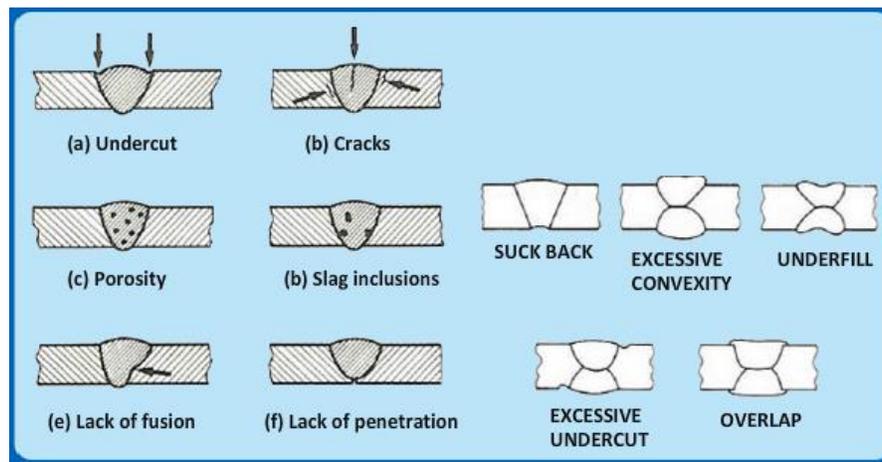
Falta de Penetración: La falta de penetración se da cuando - Figura 2 (f) - el metal de la soldadura no llega a la raíz de una soldadura, es común en algunas configuraciones de filete.

Aunque la penetración incompleta puede deberse en unos cuantos casos a la falta de disolución de los óxidos e impurezas de la superficie, las condiciones de transmisión de calor que existen en la junta son una fuente más frecuente de este defecto.



La penetración incompleta es indeseable, particularmente si la raíz de la soldadura está sujeta ya sea a tensión directa o a esfuerzos flexionantes. El área que no se funde permite concentraciones de esfuerzos que pueden resultar en fallas sin deformación apreciable.

Figura 2. Defectos de las uniones soldadas: (a) Socavación, (b) Grietas, (c) Porosidad, (d) Inclusiones no metálicas, (e) Falta de Fusión, (f) Falta de Penetración.



Fuente: <http://mechanical-engg.com/forum/gallery/image/1414-welding-defectspng/>

Estados Tensionales

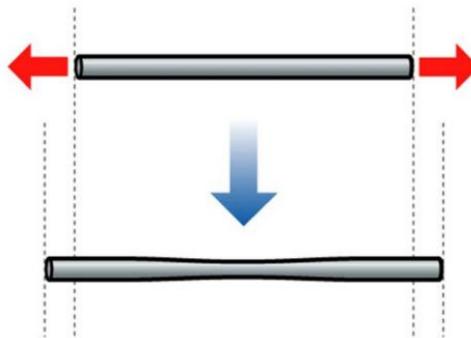
Son los estados a los cuales se someten las estructuras debido a las diferentes cargas, estos estados reflejan diferentes reacciones en los miembros o elemento-componentes. Los estados tensionales pueden ser variados y se presentan con un efecto aislado o conjunto según sea los orígenes de las cargas y la suposición de su acción en la estructura. Cabe mencionar que los diferentes estados tensionales se producen a partir de las distintas condiciones de apoyo que están presentes en la estructura donde se tienen los apoyos simples, las articulaciones y los empotramientos. Cada condición de apoyo presenta diferentes situaciones que limitan el movimiento de las estructuras.

Evidentemente en el caso de un tanque es importante aclarar que las condiciones de apoyo se presentan de un modo particular al ser una placa doblada, por lo tanto los estados tensionales se toman como un conjunto en todo el equipo. Los estados tensionales se clasifican de la siguiente manera: Tracción simple, compresión simple, flexión simple, cortante simple, pandeo y torsión.



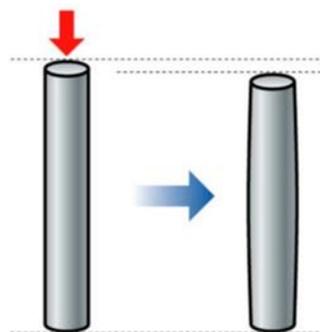
- **Tracción simple:** Este estado da como reacción en el cuerpo una separación de partículas del material. El efecto se produce debido a dos fuerzas de igual magnitud pero en sentido contrario actuando sobre la misma recta de acción. Esta separación de partículas produce además una deformación en el área transversal (disminución).

Ilustración 2. Efecto de tracción simple



- **Compresión Simple:** Es un estado de tensión en donde las partículas se aprietan entre sí, esta pieza presenta una disminución de la altura gracias a la fuerza ejercida. Existe una relación que indica que aquellos materiales que soportan bajos valores de tracción son los más capacitados para soportar compresión. Al contrario de lo que sucede al momento de soportar tracción, en la compresión el material se disminuye en tamaño en su altura pero aumenta el valor del área de su sección transversal.

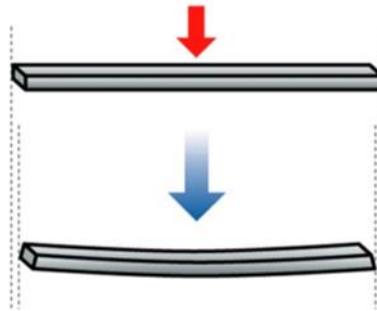
Ilustración 3. Efecto de compresión simple.





- **Flexión simple:** Este es un estado de tensión con condiciones combinadas en donde la tracción y la compresión actúan en distintas fibras del mismo material del elemento de la estructura. Una pieza al estar expuesta a flexión simple presenta dos componentes: esfuerzo cortante y momento flector.

Ilustración 4. Efecto de flexión simple.

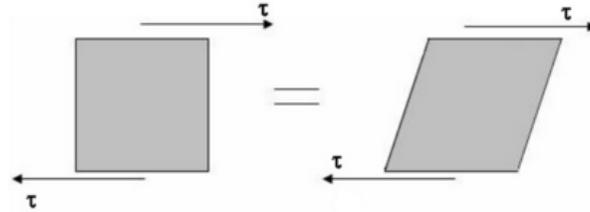


Las cargas de la viga presentan diferentes casos de deformación ya que cada material presenta una disposición diferente. Además es necesario aclarar que la rigidez de un material también varía según el modo como se dispone en el espacio. En ese sentido se afirma que una viga dispuesta con más altura y menos valor al ancho presenta mayor resistencia a cargas flexionantes y puede ser usado de este modo siempre que el diseño así lo permita.

- **Cortante simple:** Este tipo de estado tensional se presenta cuando un elemento estructural experimenta un deslizamiento con movimiento relativo entre fibras. El modo que hay para mantener el equilibrio de este estado es al actuar sobre los lados horizontales del rectángulo dos fuerzas de igual magnitud y de sentido contrario. La reacción del elemento es una deformación en donde una forma de cuadrado en la pieza queda convertida en un paralelogramo inclinado.

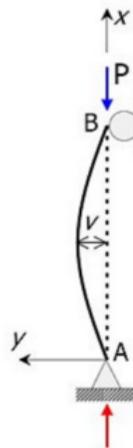


Ilustración 5. Reacción de esfuerzo cortante.



- **Pandeo:** Cuando en una barra esbelta actúa una fuerza axial de compresión y al aumentar lentamente, la pieza empieza a doblar su forma esbelta en vez de recibir la clásica deformación de un estado de compresión, donde por lo general se rompe. Esta reacción se convierte en un estado básico para realizar los diseños de las estructuras cuando se sabe que existirán valores elevados de compresión, y con ello se evita el uso de secciones estructurales muy delgadas.

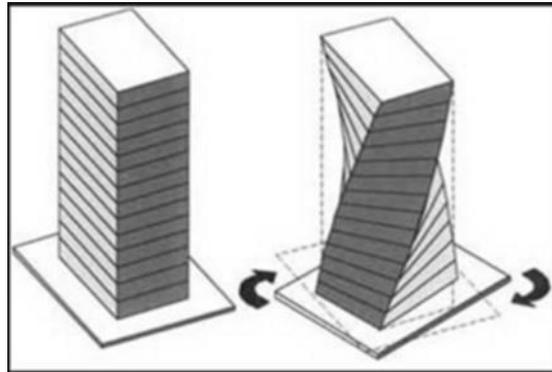
Ilustración 6. Estado de una estructura al soportar pandeo.



- **Torsión:** Este estado de tensión se presenta cuando una estructura se tiende a torcer debido a una fuerza externa. La tendencia al deslizamiento presente en los esfuerzos de cortante se encuentran también en los elementos torzonados.



Ilustración 7. Edificio sometido a torsión.



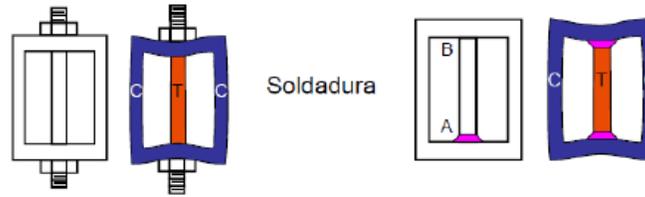
Esfuerzos Residuales por la Fabricación

Para entrar a definir lo que puede realizar los esfuerzos residuales en un equipo se tiene en cuenta la definición, las tensiones residuales son aquellas tensiones que quedan en el material en ausencia de cargas externas.

Las cargas residuales tienen un origen y un funcionamiento lo cual determina como son tratadas en el equipo. El origen de las tensiones residuales está en los procesos de fabricación de los materiales y en las condiciones de servicio que dan lugar a deformaciones no uniformes. Pueden ser deformaciones plásticas no uniformes de tal manera que el material está sometido a diferentes valores de deformación plástica en diferentes puntos. También pueden tratarse de deformaciones térmicas cuyo valor también varía para diferentes puntos. Cuando estas deformaciones se relajan se producen entonces las tensiones residuales. Los conformados que más afectan un material son los tratamientos superficiales como shot peening y soldadura. Los efectos residuales sin cargas se dan gracias a la presencia de condiciones en el proceso tales como barras unidas con tuercas o unidas mediante procesos de soldadura, donde por ejemplo al soldar el primer extremo de la barra, esta se encuentra mucho más caliente que el marco de tal forma que cuando fijamos el otro extremo de la barra, esta va a intentar comprimirse, pero como el marco se lo impide, la barra va a quedar en tracción mientras que el marco va a quedar en compresión.



Ilustración 8. Condiciones de esfuerzos residuales.



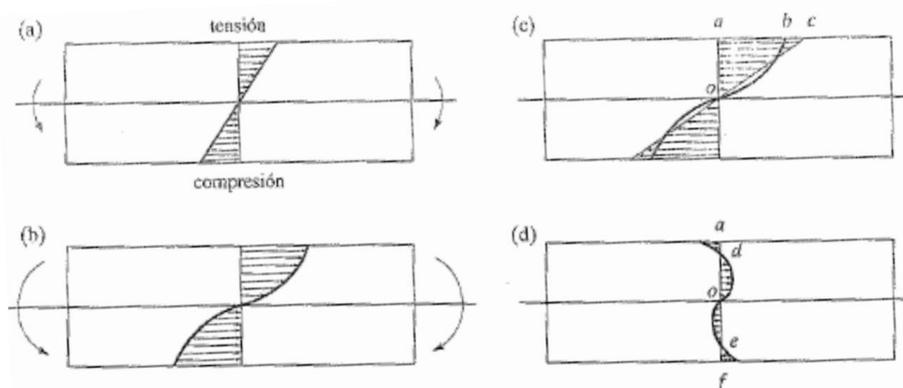
Al analizar los efectos de las tensiones residuales se procede a entender que estas tensiones no siempre implican un riesgo para el equipo. Estos valores implican un cuidado adicional a equipos debido a que son valores desconocidos de esfuerzos. La tensión aplicada sobre una estructura o sobre un material es fácil de medir y por tanto de introducirla, por ejemplo, en un cálculo por elementos finitos. Sin embargo la tensión residual es una tensión interna del material difícil de medir y que como consecuencia no suelen incluirse en el cálculo. Como bien sabemos la tensión de servicio de una estructura o material se compone por la suma de la tensión aplicada y de la tensión residual. Esto significa que si la tensión residual es desconocida, la tensión de servicio es como consecuencia también desconocida con el consiguiente riesgo. Este desconocimiento de la tensión de servicio es especialmente importante cuando estamos tratando con componentes y estructuras de alto riesgo, responsabilidad o valor económico.

Las tensiones residuales nos interesa conocerlas fundamentalmente por su influencia en los fenómenos de rotura frágil, corrosión bajo tensión y fatiga.

Las tensiones residuales son siempre un perfil, es decir, no puede ocurrir que en todas las secciones de un material tengamos solamente tensiones residuales de compresión, o únicamente tensiones residuales de tracción. Esto no puede ocurrir debido a que las tensiones residuales son auto equilibradas para que haya un equilibrio mecánico. Por lo tanto el hecho de que las tensiones residuales sean un perfil significa que si en un punto del material existen tensiones residuales de compresión, consecuentemente en otro punto del material existirán tensiones residuales de tracción.



Ilustración 9. Perfil de los esfuerzos residuales.



Las tensiones residuales de tracción en la superficie de un material o estructura son por lo general indeseables debido a que reducen la resistencia a la fatiga y a la fractura de la misma. Esto se debe a que la superficie con tensiones residuales de tracción no puede soportar tensiones adicionales producidas por fuerzas externas, tan grandes como los soportados por una superficie sin tensiones residuales. Esta reducción de la resistencia es característica particular de los materiales frágiles o menos dúctiles, en los que la fractura ocurre con poca o ninguna deformación plástica precediendo a la fractura. Las tensiones residuales de tracción también pueden llevar, después de un periodo, al agrietamiento por tensión o agrietamiento por corrosión bajo tensión. En cambio, las tensiones residuales de compresión sobre una superficie generalmente son deseables. De hecho para aumentar la vida a la fatiga de los componentes.

- **Tensiones residuales en uniones soldadas:** Los procesos de soldadura por fusión de los materiales metálicos, en los que se supera la temperatura de líquido del material base y del material de aportación, son los más ampliamente utilizados en la industria por la relativa facilidad con que puede obtenerse una unión metalúrgica perfecta, por su rapidez y por sus grandes posibilidades de automatización. No obstante, este tipo de procesos requiere un aporte térmico importante que permita superar la temperatura de fusión de los materiales a unir. Este aporte de energía provoca un flujo de calor al material base.



En los procesos de soldadura el aporte de energía está focalizado en una zona concreta, lo que provoca una transferencia o disipación de calor. Esta transmisión de calor en los materiales metálicos provoca una distribución de temperaturas y un ciclo térmico característico en la unión soldada. Dicho ciclo térmico es el primer origen de los cambios micro estructurales, tensiones y deformaciones que se producen y que afectan al comportamiento en servicio de la unión soldada de forma importante. Esto es debido a que los campos de distribución de temperaturas que se obtienen son los que determinan las tensiones residuales, las deformaciones térmicas y las debidas a eventuales transformaciones que pueden acompañar a los cambios de estado y de micro estructura.



Corrosión

La corrosión es el ataque destructivo de un material (generalmente metálico) por reacción química o electroquímica con su entorno (NACE INTERNATIONAL - THE CORROSION SOCIETY, 2004). Generalmente tiene su funcionamiento en la **Celda de Corrosión**.

La fuerza motriz de la corrosión es la tendencia natural de los metales a regresar a su estado menos energético de óxido, es decir, la corrosión es el proceso inverso a los procesos de refinación de los metales (Roberge, 2008). Un ejemplo típico de este proceso se encuentra en el ciclo del hierro (ver Ilustración 10).

Ilustración 10. Ciclo de procesado del hierro en la producción de tuberías.



Fuente: Curso de Protección Catódica. (Villamizar, 2015).

La corrosión puede variar por diferentes causas o factores. Los factores que afectan la corrosión son:

- Naturaleza del metal o la aleación.
- Presencia de inclusiones o materiales extraños en la superficie.

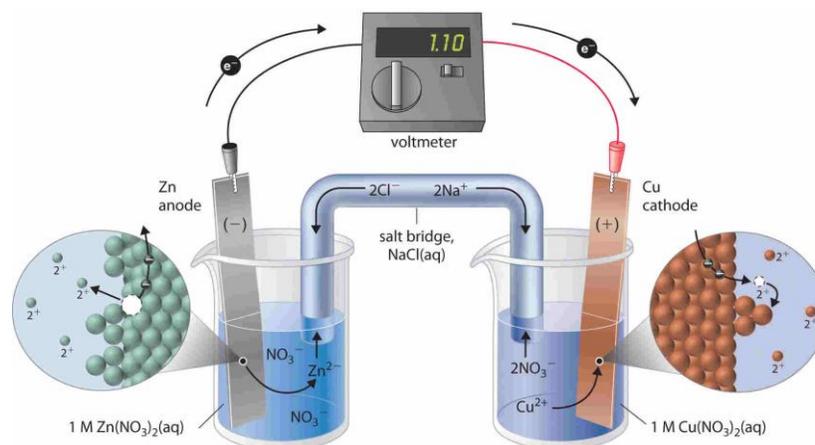


- Homogeneidad de la estructura metálica.
- Naturaleza del ambiente corrosivo.
- Presencia de oxígeno, temperatura y sales.
- Esfuerzos (Residuales, Aplicados, Estáticos o Dinámicos)
- Presencia de poros en la superficie.
- Efecto galvánico sobre metales disimiles.
- Presencia ocasional de corrientes vagabundas de fuentes externas.

Celda de Corrosión

Cuando dos metales o aleaciones diferentes se sumergen en una solución corrosiva o conectados regularmente por la humedad, cada uno desarrollar un potencial de corrosión, dando paso a una celda de corrosión. La celda de corrosión debe tener los siguientes elementos esenciales: Un ánodo, un cátodo, un electrolito y un medio conductor entre ánodo y cátodo (ver Ilustración 11).

Ilustración 11. Celda de corrosión.



Fuente: https://2784e296f5d1018e3183aa27f6c11fa82b9950e7.googledrive.com/host/0B0ULpN-97fJVMVJHWkVKWxc1bjQ/celda_galvanica_zn-cu.jpg



Cuando todos los elementos de la celda están presentes, el metal más noble actúa como cátodo y el metal más activo como ánodo. Una corriente medible puede fluir entre el ánodo y el cátodo. Si esto ocurre, se incrementará la tasa de corrosión del ánodo, mientras que la velocidad de corrosión del cátodo disminuirá. La corriente circulante entre ánodo y cátodo puede ser conocida a través de las series galvánicas³ (Revie & Uhlig, 2008).

Corrosión del Acero Inoxidable.

Corrosión Atmosférica o Uniforme

La corrosión uniforme es quizás la más fácil de identificar y tal vez la más conocida, su mecanismo tiene lugar en la celda de corrosión, donde se crean zonas anódicas y catódicas dentro del mismo material.

Se identifica debido a que se genera de manera uniformemente distribuida en una superficie donde se encuentren los elementos de la celda.

La corrosión general de un acero inoxidable se produce cuando hay desgaste de la película pasiva protectora superficial, exponiendo la superficie con mayor potencial y generando el flujo de la celda de corrosión. Este tipo de corrosión no es muy común en los aceros inoxidables, sin embargo es posible que se presente en entornos muy agresivos tales como ácidos o bases fuertes, o problemas en los procesos de fabricación. La velocidad de corrosión uniforme por lo general aumenta con factores como la temperatura o altas tasas de flujo.

Corrosión por Picadura o Pitting

El proceso de pitting es similar al proceso de corrosión atmosférica, la diferencia radica en que la densidad de corrosión en la superficie no está uniformemente distribuida. Muchas veces se genera por inclusiones no deseadas en el material. Los pittings suelen seguir propagándose debido al

³ Las series galvánicas deben indicar siempre el material de referencia (potencial cero). Las referencias más comunes son el hidrógeno y el electrodo de cobre-sulfato de cobre.



efecto de zonas de bajo oxígeno y la continua reacción de elementos corrosivos. Los pittings en los aceros inoxidable se generan por la pérdida localizada de la capa pasivante superficial del material.

Corrosión Galvánica

Su mecanismo está enteramente fundamentado en la celda de corrosión. Se genera mediante la interacción electroquímica entre materiales disimiles de diferente potencial en la serie galvánica. Las reacciones provocan que el ánodo se corroa, mientras el cátodo se conserva. Para identificar este tipo de corrosión es necesario conocer la naturaleza de los materiales unidos.

Corrosión Bajo Tensión o Stress Corrosion Cracking (SCC)

El SCC ocurre como resultado de la interacción de un esfuerzo de tensión aplicado al material y un medio corrosivo. Durante este proceso la superficie metálica usualmente es atacada en poca magnitud mientras grietas localizadas se propagan a través de la sección del material. Los esfuerzos que provocan SCC pueden ser aplicados, residuales o una combinación de ambos. Este tipo de corrosión es común en los aceros inoxidable en ambientes de cloruros.

Corrosión Intergranular

Al igual que otros materiales comunes, los metales tienen una estructura de grano visible cuando se ven con una lupa. El ataque corrosivo rápido de los límites de grano inmediatamente adyacentes con poco o ningún ataque de los granos se llama corrosión intergranular, este tipo de corrosión sólo es identificable por microscopía (NACE, n.d.; Roberge, 2008).

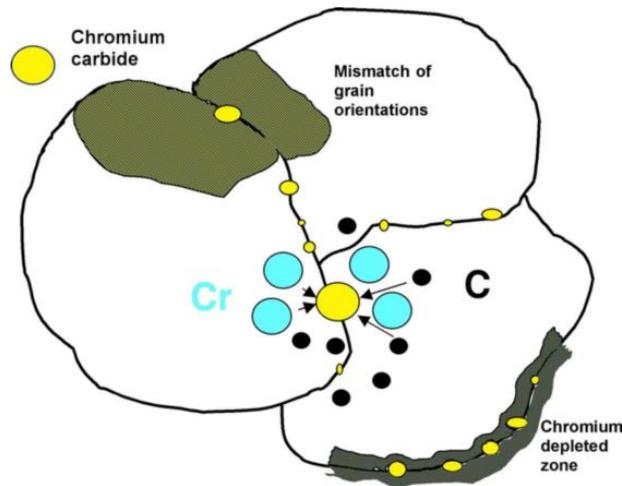
El ataque rápido en los límites de grano puede resultar en granos que se precipitan de la superficie del metal, resultando en la desintegración del acero.

Con los aceros inoxidable austeníticos, el ataque intergranular es generalmente el resultado de la precipitación de carburo de cromo (Cr_{23}C_6) en los límites de grano, lo que produce una zona estrecha del agotamiento de cromo en el límite de grano. A esta condición se le denomina



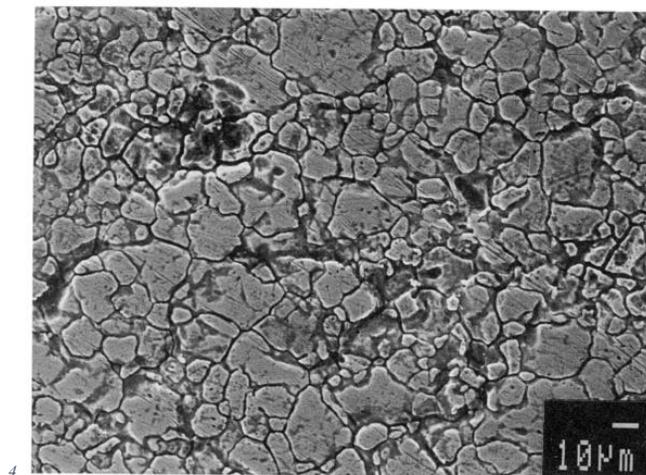
sensibilización, y se muestra de manera esquemática en la Ilustración 12. La Imagen 1 muestra un ejemplo de la microestructura de ataque de corrosión intergranular en el límite de grano.

Ilustración 12. Agotamiento de cromo en los límites de grano (sensibilización)



Fuente: <http://www.ssina.com/corrosion/igc.html>

Imagen 1. Ataque de corrosión intergranular en el límite de grano



Fuente: <http://www.ssina.com/corrosion/igc.html>

⁴ Tomado de: <http://www.ssina.com/corrosion/igc.html>



METODOLOGÍA API 579-1/ASME FFS-1

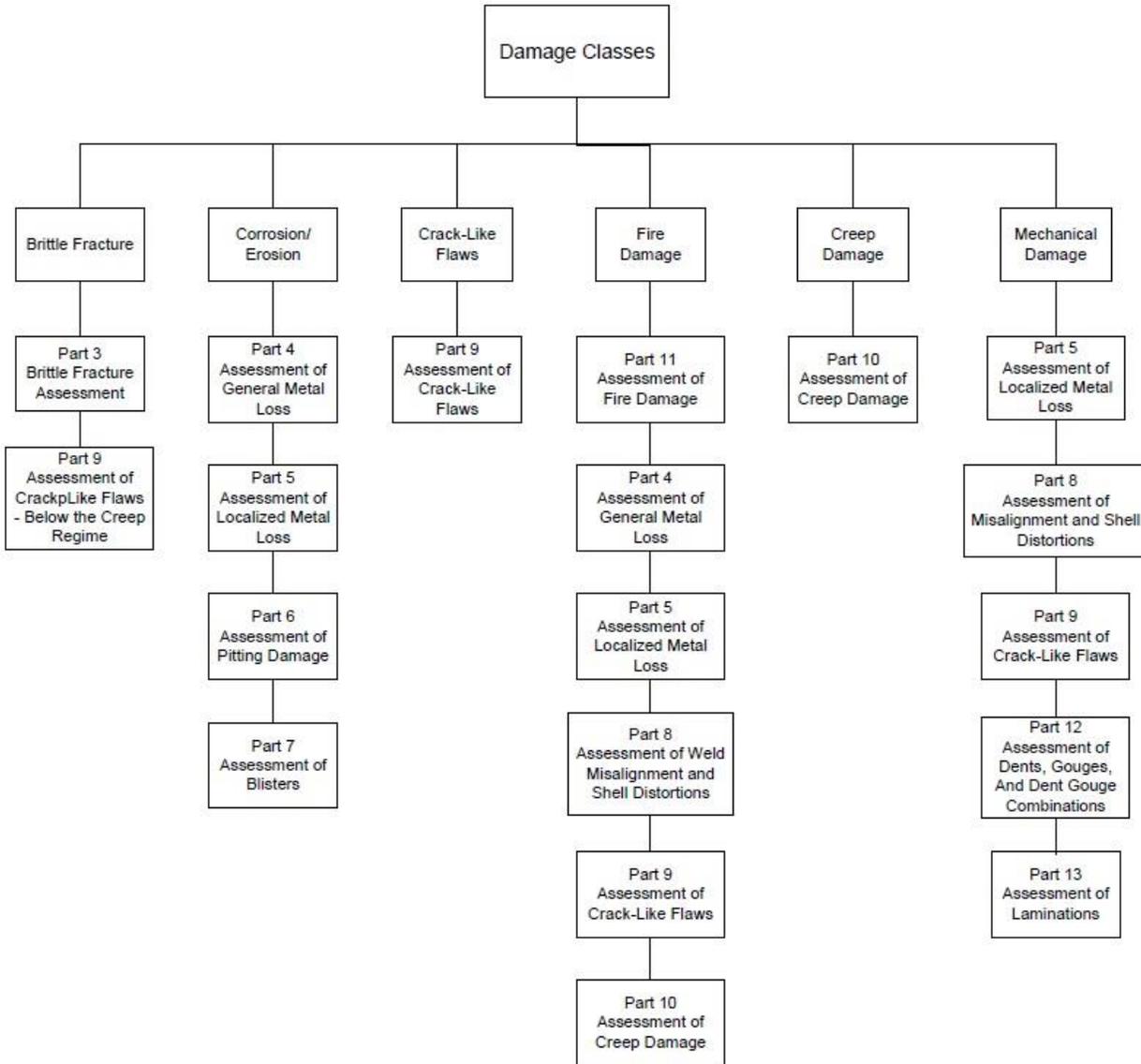
API 579-1/ASME FFS-1 está dividida en secciones las cuales cada una contiene su estructura y proporciona información bien sea general o específica de los mecanismos de falla y/o documentación necesaria para cada proceso de evaluación. Los autores Anderson & Osage (2001) explican de manera detallada la metodología API 579-1/ASME FFS-1. A continuación se expone el procedimiento en base a la Tabla 4 del documento citado, algunos de ellos traducidos en su totalidad en todo caso se recomienda comparar con (API 579-1/ASME FFS-1, 2007) para la familiarización con la estructura.

- 1. Identificación del mecanismo de falla o daño:** La normativa no puede ser aplicada si antes no se ha identificado el mecanismo de falla, así como las condiciones de diseño, métodos de fabricación, materiales de construcción, historial de servicio y condiciones ambientales. Una vez se determinan todos estos parámetros se selecciona la sección apropiada del standard para la evaluación. Siempre que se realice este paso es necesario emplear una técnica de inspección (Inspección visual, Ensayos No Destructivos - NDT por sus siglas en Inglés-, Ensayos Destructivos), esto para obtener información del estado actual del equipo.

Los mecanismos de daños que cubre la norma se presentan en la Figura 3.



Figura 3. Clases de daños que pueden ser evaluados con la norma API 579-1/ASME FFS-1 con la sección que evalúa el mecanismo de daño.



Fuente: (API 579-1/ASME FFS-1, 2007)

- 2. Aplicabilidad y limitaciones de los procedimientos de evaluación FFS:** API 579 no es aplicable en todos los escenarios posibles, por lo cual la norma indica la aplicabilidad y las limitantes para considerar su ejecución o declinar a la misma. Un ejemplo de limitante que



impide la aplicación de la norma es la evaluación de equipos que su diseño no sigue un código reconocido o estándar industrial.

3. **Data o historial del equipo:** Los históricos del equipo en estudio son necesarios siempre que se efectúe una evaluación de integridad. Los datos requeridos pueden variar en dependencia del tipo de falla presente.
4. **Técnicas de evaluación y criterios de aceptación:** Las técnicas de evaluación y los criterios de aceptación son provistos en cada sección. Si existen más de un mecanismo de daño más de una sección puede ser aplicada para la valoración del estado de la máquina.
5. **Evaluación de vida remanente:** FFS recomienda realizar un estimativo de vida remanente, o un tamaño de daño (una grieta por ejemplo) máximo para la operación segura del equipo. La norma brinda los procedimientos para estimar los daños futuros. Esta estimación puede ser usada en conjunto con un código de inspección para establecer un intervalo de inspección.
6. **Remediación:** Los métodos de remediación son provistos en cada sección y puede ser empleados para controlar daños a futuro asociados a crecimientos de grietas y/o degradación del o de los materiales.
7. **Monitoria en Servicio:** Son provistos en cada sección y pueden ser usados especialmente para los casos en los que los intervalos de inspección y la vida remanente no pueden ser establecidos adecuadamente debido a las complejidades del mecanismo de daño y ambiente de servicio.
8. **Documentación:** Debe contener el registro de todos los datos recopilados y las decisiones tomadas. La documentación requerida está contenida en la sección 2 y la información adicional relacionada con tipos de falla específicos son brindados por la sección de evaluación del mecanismo.



NIVELES DE EVALUACIÓN

La API 579/ ASME FFS-1 presenta tres niveles de evaluación con diferentes niveles de conservación.

Nivel 1

- Utiliza procedimientos de evaluación conservativos a través de inspección visual que pueden ser aplicados tanto por ingenieros como por técnicos.

Nivel 2

- Utiliza procedimientos que producen resultados más detallados y menos conservativos en comparación al nivel 1. Las técnicas comúnmente utilizadas son los NDT debido a que los equipos son evaluados mientras están en servicio.
- Este nivel exige ingenieros con experiencia en evaluaciones de Integridad Estructural a través de la norma API 579/ ASME FFS-1 Fitness For Service.
- Emplea cálculos más rigurosos de Teoría de Resistencia de Materiales y Diseño Mecánico.

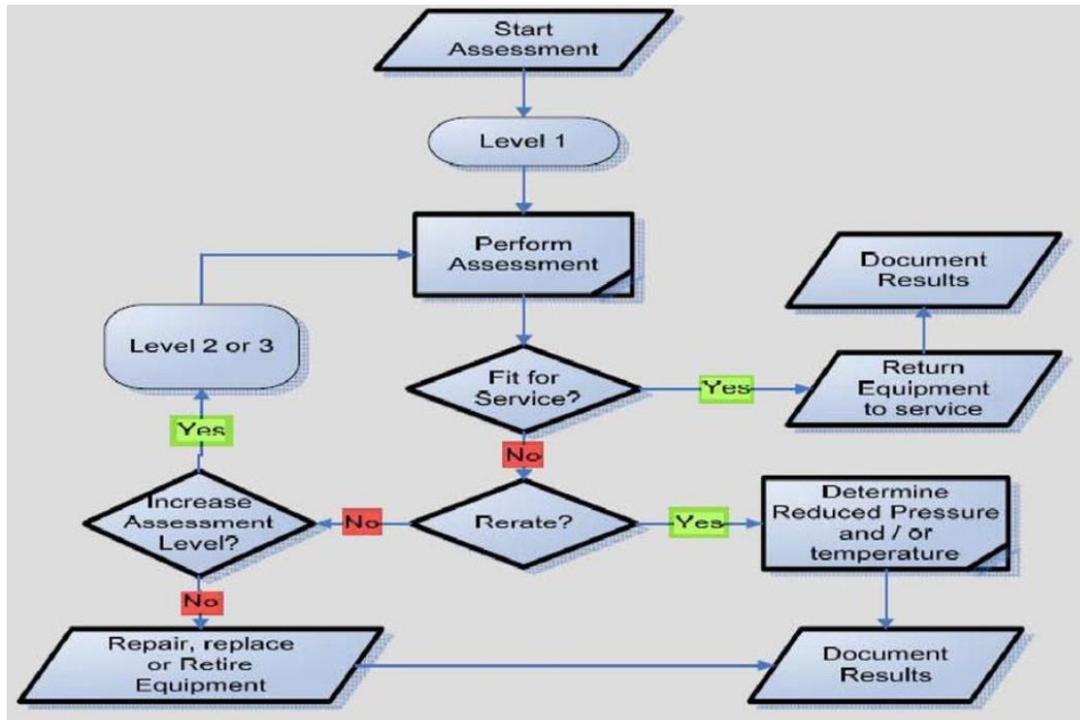
Nivel 3

- Utiliza procedimientos más detallados según lo indica la norma y produce resultados menos conservativos en comparación al nivel 2.
- Se requiere de una mayor cantidad y detalle de información es requerida. Tal información implica planos de diseño, datos actuales de la estructura como espesores, presiones de trabajo, temperatura, entre otras.
- Se basa en análisis numérico especialmente el uso de Método de Elementos Finitos.
- Se requieren ingenieros con experiencia al igual que en el nivel 2.

La evaluación por niveles se efectúa como se muestra en el diagrama de flujo en la Figura 4.



Figura 4. Diagrama de flujo de Evaluación por niveles de la norma API 579-1/ASME FFS-1.





METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN SEGÚN NIVEL 1 DE LA PARTE 9

- **PASO 1.** Determinar los esfuerzos generados por las cargas y las temperaturas para ser utilizadas en la evaluación (Párrafo 9.3.4).
- **PASO 2.** Determinar la longitud ($2c$) y profundidad (a) de la falla bajo los criterios de inspección. La falla debe ser caracterizada usando el procedimiento descrito en el párrafo 9.3.6.
- **PASO 3.** Determinar la figura de la lista en la página 9-12 de la norma para ser utilizada en la evaluación basado en la geometría del componente y la orientación de la grieta con respecto a la soldadura.
- **PASO 4.** Determinar la curva de la figura seleccionada en el Paso 3.
- **PASO 5.** Determinar la temperatura de referencia.
- **PASO 6.** Definir las longitudes máximas de grietas permisibles según la temperatura de referencia, temperatura de trabajo y la condición de la zona de evaluación.
- **PASO 7.** Evaluar resultados. Si el tamaño de falla permisible determinada en el Paso 6 es mayor o igual que el tamaño de la grieta determinada en el Paso 2, entonces el componente es aceptable para futura operación.



RESULTADOS DEL TRABAJO

Ingeniería y Ensayos del Caribe S.A.S. (2015) brinda la información del tanque T2013 a través de Inspecciones de campo y Ensayos No Destructivos realizados al equipo. La información es procesada y evaluada por medio de la norma llegando a un nivel de evaluación correspondiente al nivel tres.

Inspección Visual

Las inspecciones realizadas fueron útiles para identificar daños menores que fueron reparados y para encontrar información del estado actual del equipo.

Para poder implementar pasos correctivos se realizaron nuevos procesos, donde el primero de ellos fue el uso de tintas penetrantes, con dicho proceso se determinó el modo como fue construido el equipo donde sobresalían los procesos de SMAW (Shield Metal Arc Welding) y GMAW (Gas Metal Arc Welding).

Imagen 2. Tanque T2013





Imagen 3. Problemas de corrosión en las uniones soldadas.



Imagen 4. Más problemas de corrosión en las uniones soldadas.





Imagen 5. Defectos de soldadura detectados por medio de tintas penetrantes.



Imagen 6. Más problemas en las uniones soldadas detectados por medio de tintas penetrantes.





Imagen 7. Problemas detectados por inspección visual.



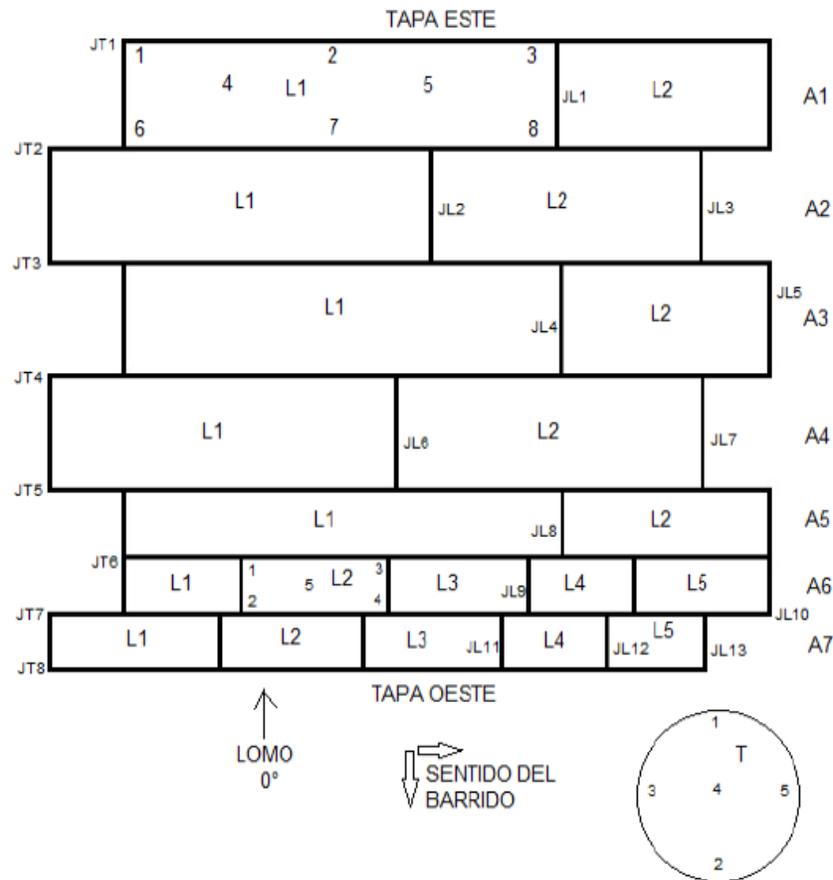
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

UTPA

Para realizar la mayor recolección de datos se procede a realizar ensayos, con los cuales se verifica la condición actual del equipo. Se procedió a tomar una medición de espesores de las láminas que conforman el cuerpo, luego se realizaron ensayos de ultrasonido (UTPA Phased Array) y se verificó la integridad de las juntas soldadas. El equipo fue evaluado en un 85% del total de su volumen.



Imagen 8. Representación gráfica del desarrollo del tanque.



La imagen muestra las láminas que conforman el cuerpo del tanque considerando que todas están unidas de manera plana; considerando el sólido en revolución como una superficie extendida. La nomenclatura mostrada en la imagen es la siguiente:

JT: Junta Transversal

JL: Juntas Longitudinales

A: Anillos o virolas

L: Láminas

T: Tapas del tanque



Paralelamente se considera el lomo (parte superior del tanque) como la línea de 0° para el barrido de las juntas transversales. Las tapa 1 representa la tapa este (asumiendo sistemas de coordenadas cardinales) y la tapa 2 la tapa oeste.

Con los ensayos se obtuvo:

Cuadro 2. Medidas de espesores (mm).

	TML 1	TML 2	TML 3	TML 4	TML 5	TML 6	TML 7	TML 8
A1-L1	13.02	12.7	12.86	12.22	12.35	11.98	12.66	12.79
A1-L2	12.92	12.9	12.8	12.62	12.44	12.09	12.12	12.95
A2-L1	8.32	8.65	8.72	8.74	8.62	8.54	8.58	8.82
A2-L2	8.69	8.63	8.32	8.81	8.47	8.36	8.22	8.84
A3-L1	9.39	8.48	8.87	8.48	8.76	8.78	8.65	8.7
A3-L2	10.68	10.38	9.67	9.9	9.88	10.69	10.61	10.6
A4-L1	12.25	12.38	11.85	11.87	11.4	12.1	12.41	11.28
A4-L2	12.85	11.86	11.9	11.62	11.58	11.34	11.87	12.47
A5-L1	8.39	8.5	8.7	8.2	8.25	8.27	8.45	8.27
A5-L2	10.46	10.33	11.04	11.11	11.08	11.0	10.91	10.98
A6-L1	8.35	8.67	8.75	8.5	8.54	-	-	-
A6-L2	8.38	8.29	8.33	8.42	8.44	-	-	-
A6-L3	8.45	8.51	8.37	8.66	8.5	-	-	-
A6-L4	8.32	8.8	8.65	8.75	8.54	-	-	-
A6-L5	8.51	8.48	8.74	8.42	8.36	-	-	-
A7-L1	12.02	12.61	12.4	12.5	12.54	-	-	-
A7-L2	11.9	11.6	11.5	11.7	11.6	-	-	-
A7-L3	8.25	8.72	8.88	8.43	8.81	-	-	-
A7-L4	8.48	8.38	8.36	8.32	8.36	-	-	-
A7-L5	8.33	8.43	8.84	8.86	8.89	-	-	-
T1	11.7	11.1	10.9	11.2	11.4	-	-	-
T2	10.8	10.6	10.9	11.0	11.2	-	-	-

La tabla demuestra los valores de los espesores en el 85% del tanque, en donde se relacionan según la ubicación que con la nomenclatura refiere una zona específica. Este resultado de medidas de espesores indica las condiciones actuales y las zonas en donde existió la pérdida de material a raíz de un desgaste.

El posterior ensayo de UTPA permite observar de modo puntual las zonas con defectos y las medidas que estos defectos contienen, dichos defectos están distribuidos así:



Imagen 9. Defecto de la JT1, ubicado a partir de los 170°, a una profundidad de 6.68mm y con 200mm de Longitud. Inspeccionada desde el exterior.

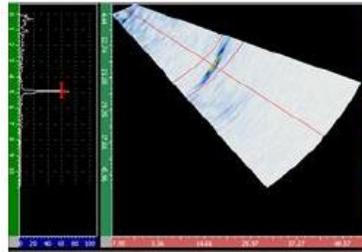


Imagen 10. Defecto a lo largo de toda la JT2, ubicado en la raíz. Inspeccionada desde el exterior.

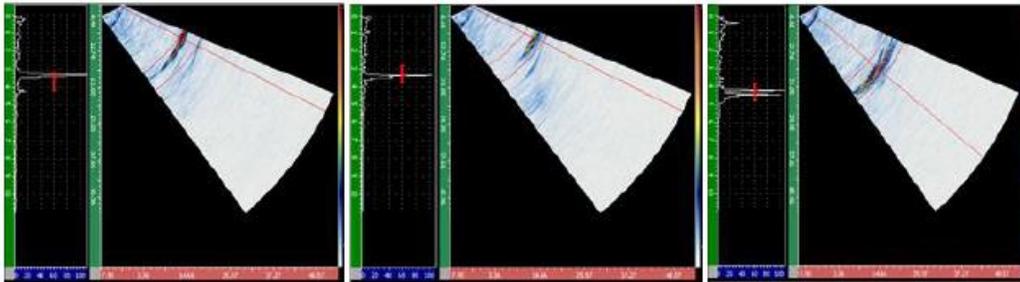


Imagen 11. Defectos de la JT3, ubicados a 30°, 45° y 90° a profundidades y longitudes respectivamente de 4.2, 2 y 3 mm; 20, 100 y 120 mm.

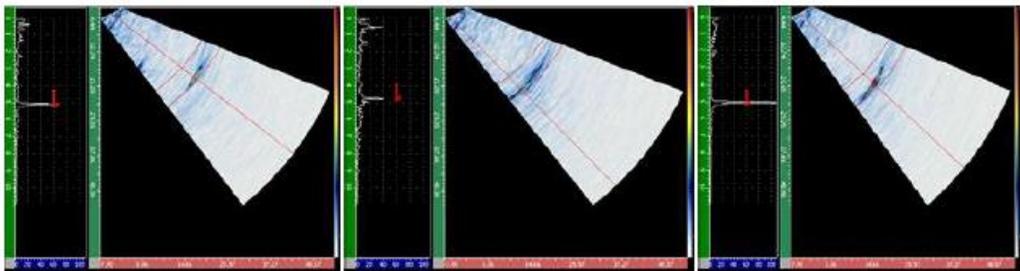




Imagen 12. Defectos de la JT5, ubicados a 110°, 190° y 250° a profundidades y longitudes respectivamente de 6.98, 7.2 y 7.8 mm; 260, 150, 200mm

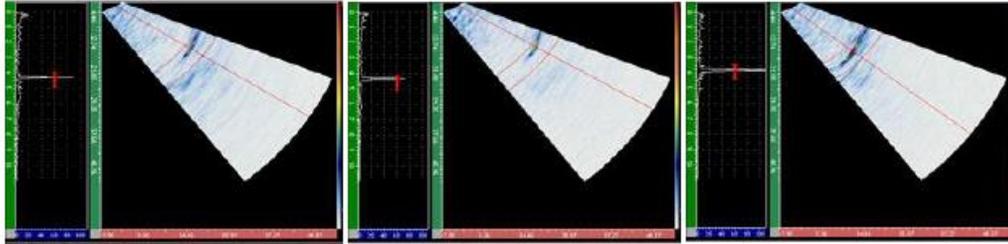


Imagen 13. Poros de la JT6, ubicados a 200° con profundidades de 6.3 y 7 mm. Esta junta no presenta uniformidad, es decir, al parecer una parte fue aplicada desde el exterior y otra desde el interior, por lo que registra socavaciones en toda su longitud alcanzando profundidades entre 3 y 4 mm.

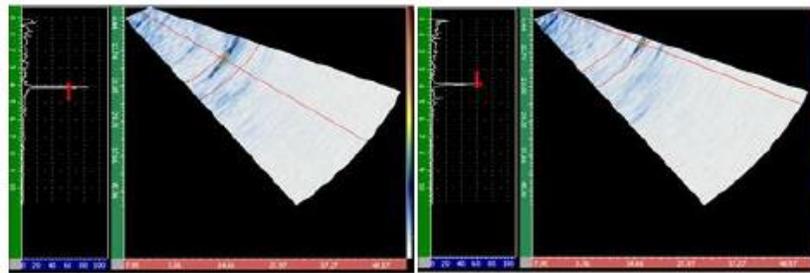


Imagen 14. Defecto y poro de la JT7, ubicados a 180° y 240° a profundidades de 5.85 y 4.81 mm y con una longitud de 210mm ambas.

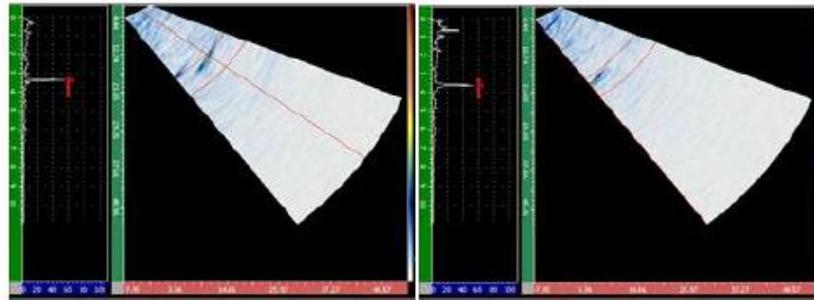




Imagen 15. Defectos de la JT8, ubicados a 180°, 220° y 250° a profundidades y longitudes respectivamente de 5, 8.18 y 5.51mm; 200, 130 y 210mm

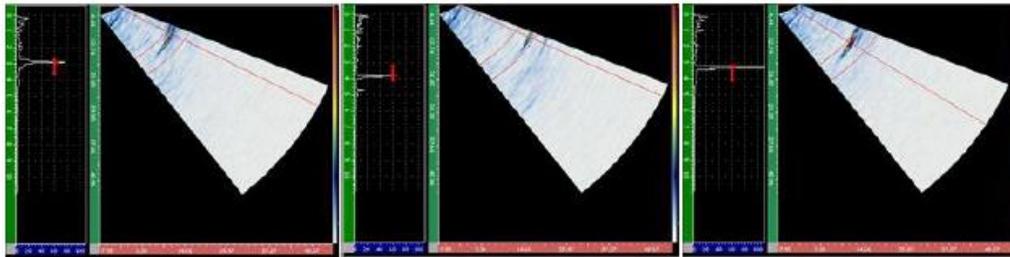


Imagen 16. Defecto de la JL9, a una profundidad de 2.58 y una longitud de 140mm

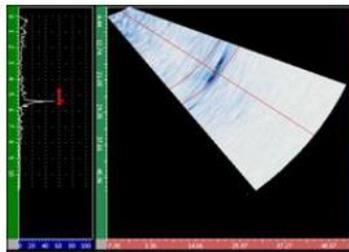


Imagen 17. Defectos de la JL11, a profundidades de 4.8 y 5.38mm y longitudes de 130 y 200mm respectivamente.

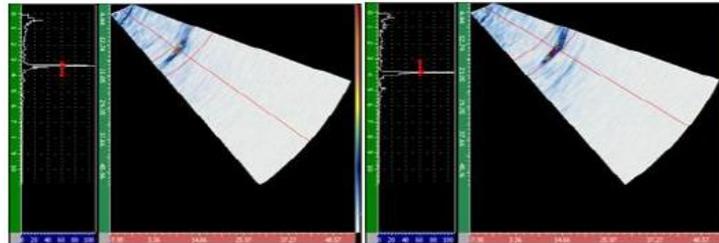
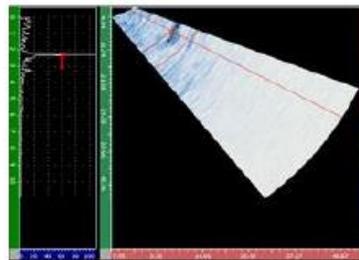


Imagen 18. Defecto de la JL12, en la raíz, con una longitud de 220mm.



Finalmente, los resultados permiten obtener hallazgos en las juntas entre los soportes estructurales de acero al carbón y el cuerpo del tanque en 304L, las cuales se realizaron con un electrodo de transición 308L. Posteriormente, en el análisis que se realiza a los resultados, la zona donde se realizó la reparación y se ubicó un elemento tensor evitando el procedimiento de soldadura



(Soporte estructural 4) no se reporta un hallazgo relevante de pérdida de material o detección de falla, el cuerpo se encuentra actualmente abrazando el tanque manteniendo la tensión.



EVALUACIÓN DE LA FALLA A TRAVÉS DE LA NORMA

La evaluación según el nivel 1 se puede realizar si se cumplen las condiciones del párrafo 9.2.2.1 de la norma. De ser satisfechos estos criterios se realiza la evaluación para el primer nivel y de no ser satisfechas por consiguiente se realiza la evaluación para nivel 2.

EVALUACIÓN DE CONDICIONES GEOMÉTRICAS

Los cálculos se llevan a cabo con el fin de determinar si las condiciones de trabajo permiten el buen funcionamiento del equipo, donde es claro que las condiciones de diseño son el tope que da al evaluador el límite de trabajo. Estos cálculos llevarán al evaluador al uso de la norma haciendo cumplir a cabalidad los parámetros ahí expuestos.

Los resultados buscan entender el modo como las discontinuidades están creciendo en el equipo y el modo como seguirán comportándose bajo las actuales condiciones de trabajo.

Datos iniciales:

- Material: Acero Inoxidable 304L.
- Condiciones de diseño: 200psig @100°C
- Diámetro interior: 125, 196 in
- Espesor: 0,47 in = 12mm
- Perdida uniforme: 0,16 in = 4mm
- Eficiencia de la unión soldada: 0.9

Condiciones de operación: El tanque no se expone a presiones superiores de 50psig@40°C, esto debido a no tener fluido comprimido en su interior y su trabajo ya no es aislado térmicamente.

Datos de inspección: Los datos usados en los cálculos fueron obtenidos con ayuda de instrumentos Phased Array, el cual funciona con alta precisión. La discontinuidad más crítica que se reportó fue de 7,8mm = 0,31 in de profundidad y 200mm = 7,87 in de longitud.

Inicialmente se evalúa el funcionamiento con el nivel 1 párrafo 9.4.2.2



Geometría:

Primera condición geométrica: Placa con rolada forma cilíndrica.

Cilindro con relación $\frac{R}{t} \geq 5$ (donde t es el grosor actual del equipo teniendo en cuenta la pérdida), esta relación de dimensiones indica que de cumplirse, las condiciones geométricas son aptas para el funcionamiento. Las medidas son tomadas en pulgadas ya que el valor de 5 es una relación tomada para unidades en pulgadas.

$$t = t_{nom} - perdida = 0,47 - 0,16 = 0,31 \text{ in}$$

$$R = \frac{D}{2} = \frac{125,196}{2} = 62,598 \text{ in}$$

Conociendo estos valores se prueba la relación:

$$\frac{R}{t} = \frac{62,598}{0,31} = 202 \text{ (adimensional)}$$

Entonces:

$$\frac{R}{t} = 202 \quad \therefore \quad 202 > 5 \text{ Cumple la condición geométrica de la norma}$$

Además de lo anterior se compara la pérdida con el grosor actual:

$$0,31 > 0,16$$

Se observa que la zona en donde ya hubo pérdida es mayor que la pérdida como tal.

Segunda Condición geométrica:

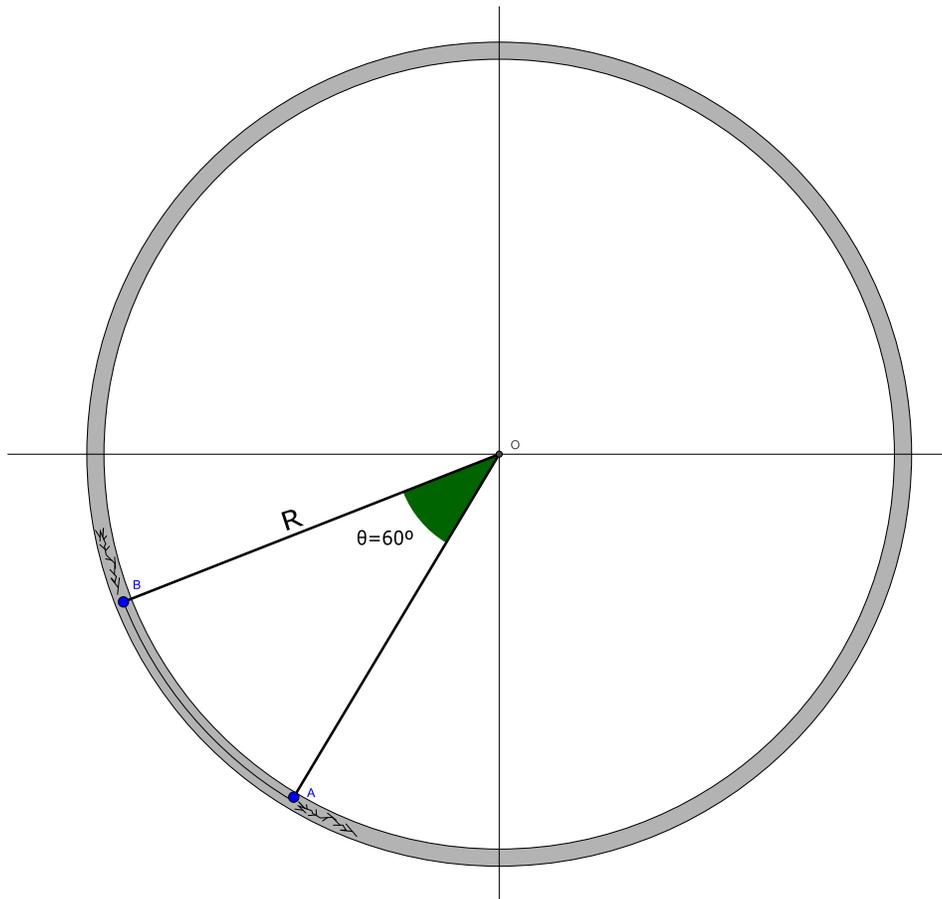
- La longitud de la grieta a lo largo del espesor presenta una longitud máxima de 7,87 in, donde se trabaja con un espesor de 0,31.
- Primero se debe calcular la longitud que separa la grieta más crítica de otra cercana. Al ser un arco se trabaja como tal y el ángulo de separación entre ellos es 60° , conociendo esto se tiene:



$$S = \theta * R$$

$$S = \frac{60 * 2 * \pi}{360} * 125,196 = 131,10 \text{ in}$$

Ilustración 13. Longitud de la grieta. Método gráfico. (No a escala)



La segunda condición geométrica es: Longitud de la discontinuidad más cercana debe ser mayor a $1,8\sqrt{Dt}$, esta relación debe ser menor a la longitud entre las grietas sino no cumple la condición.

- Longitud entre grietas: 131,10 in
- Condición: $1,8\sqrt{(125,196) * (0,32)} = 11,4 \text{ in}$

Entonces:



$$131,10 \text{ in} > 11,4 \text{ in}$$

Se cumple la condición por la tanto las dos condiciones geométricas cumplen con éxito, a nivel de dimensiones el tanque puede trabajar hasta el punto que las grietas tengan un tamaño más nocivo para el equipo.

CONDICIONES DE CARGA

La presión solo produce esfuerzos de membrana.

Los valores de esfuerzos de membrana con las condiciones de diseño son conocidos o pueden ser calculados.

La unión soldada es en arreglo en V.

PROPIEDADES DEL MATERIAL

Tabla 4. Propiedades Mecánicas del acero AISI 304L.⁵

Parámetro (Nomenclatura)	Valor
Esfuerzo a la fluencia (S_y)	210 MPa
Esfuerzo a la tracción (S_{ut})	564 MPa
<i>Stress Flow</i> (S_f) ⁶	387 MPa

EVALUACIÓN SEGÚN NIVEL 1 DE LA PARTE 9

- **PASO 1.** Determinar los esfuerzos generados por las cargas y las temperaturas para ser utilizadas en la evaluación (Párrafo 9.3.4).

Para calcular los esfuerzos se realiza una medición de espesor y se selecciona la zona crítica en la unión de la soldadura ubicada en la junta transversal 5 (JT5).

⁵ <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MQ304L>

⁶ En concordancia con API 579 Anexo F 2.2.2. y con el código ASME Section 7, Division 2 para aceros inoxidables austeníticos.



Los esfuerzos son determinados empleando el algoritmo realizado en el programa Scilab 5.5.2 mostrado en el Anexo 2 para evaluar un tanque presurizado considerando la presión de trabajo (50 psig) como la presión a la que se mantiene el fluido, y la máxima presión se desarrolla en el fondo del tanque donde se encuentra aplicada la presión de almacenamiento más la presión hidrostática de la mezcla almacenada. Se considera esta presión máxima igualmente distribuida en todas las paredes del tanque con el fin de aplicar las ecuaciones para cilindros presurizados de pared delgada⁷.

Para un espesor de 8.2 mm según los resultados de medición de espesores (Ingeniería y Ensayos del Caribe S.A.S., 2015) en la zona más crítica detectada en la unión soldada en la zona A5-L1 según la Imagen 8, los esfuerzos de membrana son:

Tabla 5. Esfuerzos de membrana y Factor de Seguridad en la zona de soldadura sin considerar variación del campo de esfuerzos por la presencia de grietas.

Parámetro (Nomenclatura)	Valor
Esfuerzo de Von Mises (V_m)	71.52 MPa
Esfuerzo Longitudinal (σ_l)	0.29 MPa
Esfuerzo Tangencial (σ_t)	71.66 MPa
Factor de Seguridad (FS) ⁸⁹	5.41

- **PASO 2.** Determinar la longitud ($2c$) y profundidad (a) de la falla bajo los criterios de inspección. La falla debe ser caracterizada usando el procedimiento descrito en el párrafo 9.3.6.

Se caracteriza la falla según los Ensayos No Destructivos para determinar una longitud de grieta equivalente. Para eso se tiene que:

⁷ Tomadas de (Budynas & Nisbett, 2012)

⁸ En concordancia con API 579 Anexo F 2.2.2. y con el código ASME Section 7, Division 2 para aceros inoxidables austeníticos. Se especifica que FS debe ser mayor o igual a 3 para aceros inoxidables austeníticos.

⁹ FS es la relación del *Stress Flow* y el esfuerzo de Von Mises.



$$\sigma_2 = \sigma_t \quad \text{y} \quad \sigma_1 = \sigma_t$$

Para determinar el valor de la longitud equivalente se calculan los valores del ángulo α , el cual es el ángulo entre el plano de esfuerzo principal y el plano de la grieta. Además se calcula un valor de B que representa la relación entre esfuerzos.

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right)$$

Con los valores de la tabla 5 se obtiene:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{0.29}{71.66} \right)$$

$$\alpha = 0.23^\circ$$

Calculando B:

$$B = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$$

$$B = \frac{0.29}{71.66}$$

$$B = 0.004$$

Conociendo α y B se procede a determinar la relación c/c_m , donde c es la mitad de la longitud de la grieta medida, y c_m es la mitad de la longitud de la grieta equivalente. La relación c/c_m es aproximadamente 1 según la figura 9.3 de la norma. Por lo tanto se utiliza las dimensiones de grieta obtenida por Ensayos No Destructivos.



- **PASO 3.** Determinar la figura de la lista en la página 9-12 de la norma para ser utilizada en la evaluación basada en la geometría del componente y la orientación de la grieta con respecto a la soldadura.

Se utiliza la figura 9.15 para evaluar un cilindro con junta circunferencial y grieta paralela a la junta.

- **PASO 4.** Determinar la curva de la figura seleccionada en el Paso 3.

Para seleccionar el valor del tamaño de grieta permisible, se debe escoger a partir de dos criterios:

Inicialmente se comprueba la dimensión del espesor, en donde se aplica que el espesor es menor a 1 pulg (25 mm), y el segundo criterio será que la dimensión $a \leq \frac{1}{4} t$, donde t es el espesor de pared.

Para la zona de soldadura con un espesor de 8.2 mm, se cumple el primer criterio. Posteriormente se tiene que $6,98 \text{ mm} \leq \frac{1}{4} (8.2 \text{ mm})$.

$6,98 \text{ mm} \leq 2,05 \text{ mm}$ (Falso), por lo cual se selecciona la línea punteada de la curva C en la figura 9.15M.

- **PASO 5.** Determinar la temperatura de referencia.

Se selecciona la curva de trabajo en la tabla 3.2 de la norma, donde se selecciona la curva A debido a que es una aleación de bajo carbono que no está en la lista de las curvas B, C y D para determinar la temperatura de referencia según el espesor del componente en la figura 3.4 de la API 579.



Para el espesor de 8.2 mm es $T_{ref} = -8^{\circ}C$ en la figura 3.4 de la norma.

- **PASO 6.** Definir las longitudes máximas de grietas permisibles según la temperatura de referencia, temperatura de trabajo y la condición de la zona de evaluación.

de la norma para seleccionar la longitud permisible de la grieta, con un valor de temperatura igual a $T=114^{\circ}C$. Con este valor se obtiene una longitud permisible $2c = 20mm$.

- **PASO 7.** Evaluar resultados. Si el tamaño de falla permisible determinada en el Paso 6 es mayor o igual que el tamaño de la grieta determinada en el Paso 2, entonces el componente es aceptable para futura operación.

Para culminar el análisis se comprueba que la falla tenga un valor inferior a la longitud de la grieta permisible. Si dicho valor es menor entonces se satisface el nivel 1, de lo contrario es rechazado según este nivel.

En la unión soldada es rechazado según el criterio de nivel 1, con una longitud de grieta medida igual a 260 mm y una longitud de grieta permisible de 20 mm, por lo cual se debe efectuar la evaluación de nivel 2.

Al iniciar la evaluación de nivel 2 de análisis de la norma, se tiene que uno de los parámetros es que la grieta medida por END sea menor a 8 pulgadas (203 mm), por lo cual inmediatamente es rechazado para evaluación de nivel 2 según lo indicado en el párrafo 9.2.2.1.



DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Durante las inspecciones se detectaron defectos superficiales como picaduras y socavaciones los cuales no representan un riesgo para el buen funcionamiento del equipo. Sin embargo, la presencia de grietas y corrosión han sido los causantes de las fugas en el equipo. Estos defectos se encuentran ubicados en la unión de los soportes de refuerzo que son de acero al carbono ASTM A7 con el acero inoxidable austenítico 304L correspondiente al cuerpo del tanque. Las zonas alejadas a los soportes no presentan mayor deterioro.

Para evaluar la condición del tanque se realiza una serie de ensayos no destructivos. Los resultados de UTPA permitieron detallar la forma y profundidad de las grietas (ramificada en forma de abanico), estas son formas típicas generadas por la corrosión bajo tensión. Las fugas además de presentar una relación con el proceso de corrosión también surgen en las uniones de las toberas con el tanque cerca de las zonas con soldadura.

El tanque fue diseñado con acero AISI 304L en el año 1973. Con los ensayos realizados se demostró el uso de procesos de fabricación como SMAW (usado en la época). Se determina, además, la ventaja ante la sensibilización a la corrosión intercrystalina gracias a que el material es de bajo carbono (indicado por “L” que significa Low Carbon). Aunque si bien el uso de este material es algo acertado, los refuerzos estructurales son de acero al carbono unidos mediante un proceso de soldadura, esto vuelve propenso al equipo a sufrir corrosión por micro pilas galvánicas.

Al usar el AISI 304L se tienen varias ventajas. Al ser un material popular resulta económico el uso de éste en comparación con otros aceros inoxidables austeníticos. El uso de acero de bajo carbono ($\%C < 0,03\%$) reduce el porcentaje de carburo de cromo, estos se forman en el límite de grano cuando se calienta el material entre 500°C y 850°C , aunque estos no se eviten por completo debido a la existencia de tensiones residuales procedentes del rolado. Además se debe analizar un proceso de sensibilización a la corrosión intercrystalina (CIC) de baja temperatura de los aceros de grado “L”, proceso que se da a temperaturas menores a los 300°C , esto contribuye a la creación de corrosión bajo tensión. El equipo, de haber trabajado como reactor en su vida temprana, estuvo mucho tiempo en los rangos de temperatura de sensibilización a la CIC.



La corrosión bajo tensión presente en el equipo se debe a la unión de tensión de tracción y la exposición a un ambiente corrosivo. Al tener tensiones residuales gracias a los procesos de soldadura se producen las condiciones propicias para que den paso al SCC. No se pasa por alto la presencia de productos generadores de corrosión en espacios confinados.

Los eventos de corrosión bajo tensión se pueden presentar bajo diferentes panoramas (intercristalina ó transcristalina), con el uso de END (ensayos no destructivos) se detecta alguna clase de ramificación, sin saber exactamente cual, pero se determina la presencia de tal falla. El proceso de fabricación y soldadura fueron los elementos que dan paso al problema en los cuales se producen zonas de afectación térmica (ZAT). Se presume que en esa época no se efectuaron tratamientos de alivio de tensiones dada la geometría y dimensiones del tanque.

A la condición actual del equipo se le agrega el hecho de que los esfuerzos de rolado exterior son esfuerzos de tracción, al igual que los esfuerzos en la soldadura de soportes rígidos. Esto se agrega al caso conociendo que los estados tensionales de tracción afectan más que los de compresión.

El equipo se expone a varios eventos juntos como son, las micropilas galvánicas en la zona del cordón, esto permite una disolución de ferrita por corrosión selectiva (debido a su comportamiento anódico frente a la austenita) y este es el inicio de la grieta por debilitación del material, el proceso seguirá en la medida de la cantidad de ferrita presente en el cordón. Además los agentes corrosivos y la ausencia de material aislante (inicialmente tuvo) permiten que la microgrietas atraviese la pared del acero.

Para la evaluación de los criterios de diseño, ensayos no destructivos y especificaciones de los materiales se usaron los códigos ASME VIII, ASME V y ASME II, respectivamente. Estos son necesarios de usar paralelamente a la norma API 579-1/ASME FFS-1 la cual en este caso permite evaluar la condición actual del tanque, el cual es rechazado para los niveles 1 y 2 de la misma normativa. Se resalta que luego de efectuar los niveles de evaluación la norma permite tomar decisiones del tipo *revaluar, reparar o reemplazar*, los cálculos fueron revaluados y se obtuvieron los mismos resultados, la opción de reemplazar no es la más óptima debido a los altos costos que implica reemplazar el tanque de tan grandes dimensiones y el costo de termino de ciclo de vida, adiciona que el cuerpo del tanque es apto para continuar en servicio debido a que según las



inspecciones realizadas no se detectaron grietas en el cuerpo del tanque. Paralelamente no se efectúa la evaluación de nivel 3 de la norma puesto que la misma exige que sea realizado por personal calificado y experto en el manejo de la misma y de otras herramientas más avanzadas como el uso de software especializados en elementos finitos, además de que es conocido que el problema persistirá por la naturaleza de la unión soldada entre el AISI 304L y el acero negro ASTM A7, por lo cual los autores del presente trabajo recomiendan reparar el tanque reemplazando las uniones soldadas por uniones mediante tensores, el cual es descrito en mayor detalle en las recomendaciones y conclusiones del presente trabajo.



CONCLUSIONES

Al culminar el proceso de evaluación a través de la norma se obtiene que el equipo, siendo reparado e implementando un método de unión mecánica no permanente, es apto para continuar en servicio bajo las condiciones de carga actuales. Esto es sustentado debido a los resultados obtenidos por la evaluación analítica siguiendo la metodología descrita en la norma API 579-1/ASME FFS-1 Sección 9.

El proceso de unión mecánica permanente a través de soldadura es el causante de los problemas de fuga debido a la incompatibilidad metalúrgica entre los metales unidos; AISI 304L y ASTM A7. Esta incompatibilidad genera microgrietas que al interactuar con los esfuerzos tensionales y el medio corrosivo provoca el fenómeno de corrosión asistida por esfuerzo o SCC (Stress Corrosion Cracking).



RECOMENDACIONES

En base a las conclusiones se recomienda a la empresa no reemplazar el equipo por uno nuevo debido a los altos costos que esto implica y a que el equipo es apto para el servicio una vez reparado y unido mediante tensores (método empleado en la reparación de un anillo) como se indica a continuación.

En las juntas soldadas a los anillos de soporte estructural se debe retirar las láminas de acero negro (ASMT A7) y reemplazarlas por unas láminas de acero inoxidable por medio de un proceso de soldadura usando un electrodo de transición 308L, tal como el resto del cuerpo, con lo cual se evitan casos de heterogeneidad y micropilas galvánicas. Una vez realizado el remplazo de la lámina, se ubica el tensor en la zona donde estaba el anillo de soporte (unión mecánica no permanente), el cual se construye con acero al carbono AISI 1020. Esta diferencia a gran escala generaría una pila galvánica y permite un inicio de corrosión por espacios confinados. Para evitar dicha situación se recomienda el uso de un polímero de alta densidad con el que se separen los materiales y prevenga tales procesos de corrosión. Para efectuar esta reparación es necesario hacer las siguientes claridades:

Los tensores son elementos diseñados según la necesidad y no existe una empresa que produzca dichos materiales en serie, por lo cual, la empresa que amerite uso de un equipo de este estilo puede usar un mecanismo para el soporte según sus propios medios lo permitan. Posteriormente cada empresa debe generar el diseño del equipo y cubrir el gasto para la producción del mismo, lo cual es analizado a través de una relación de costos beneficios.

En el caso de la empresa Mexichem, se propone evaluar los otros tanques de despojo en servicio, evaluar la metodología mostrada y emplear tensores siempre que la situación lo permita. Esta decisión implica una inversión que con el paso del tiempo dará a la empresa retribución de ahorro en comparación del reemplazo de los equipos, además asegura que el tiempo de vida del equipo crezca y se brinde la seguridad pertinente a los trabajadores ya que el contacto directo con los desechos puede desembocar en enfermedades mortales para quien se exponga a ellos.

El mecanismo que la empresa Mexichem usa en los tensores es un anillo que cubre la lámina por la parte exterior, de acero al carbono, el cual abraza al equipo y en la unión se hace uso de un cable



(guaya) de 3 milímetros de diámetro para mantener el equipo unido y dar soporte al tanque. El cable al ser un material de difícil manejo se asegura mediante el uso de prensas o equipos hidráulicos para asegurar con firmeza el equipo. El uso de acero al carbono junto con el material base de la placa (acero 304L) crea un efecto de corrosión por tener materiales con diferentes potenciales, pero se protege al acero inoxidable lo cual es favorable, y aunque se desgaste el tensor, el daño se presentará de modo tan prolongado que la empresa puede fabricar un nuevo tensor cuando este ya presente un desgaste crítico y no existiría pérdida ya que este proceso tomaría años en completarse.

Se recomienda a la empresa realizar estudios de metalografía y tenacidad del material para una evaluación más profunda del estado actual del equipo.



ANEXOS

Anexo I. Composición Química de los Aceros Inoxidables.

COMPOSICIÓN QUÍMICA TÍPICA DE ACEROS INOXIDABLES (MATERIAL BASE)

Composición % (a)

TIPO AISI AUSTENITICOS	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	OTROS
201	0,15	5,5-7,5	100	16,0-18,0	3,5-5,5	0,06	0,03	0,25N
202	0,15	7,5-10,0	100	17,0-19,0	4,0-6,0	0,06	0,03	0,25N
205	0,12-0,25	14,0-15,5	100	16,5-18,0	10-17,5	0,06	0,03	0,32-0,40N
301	0,15	2,00	100	16,0-18,0	6,0-8,0	0,045	0,03	
302	0,15	2,00	100	17,0-19,0	8,0-10,0	0,045	0,03	
302B	0,15	2,00	2,0-3,0	17,0-19,0	8,0-10,0	0,045	0,03	
303	0,15	2,00	100	17,0-19,0	8,0-10,0	0,20	0,15min	0,6 Mo
303Se	0,15	2,00	100	17,0-19,0	8,0-10,0	0,20	0,06	0,15min Se
304	0,08	2,00	100	18,0-20,0	8,0-10,5	0,045	0,03	
304H	0,04-0,10	2,00	100	18,0-20,0	8,0-10,5	0,045	0,03	
304L	0,03	2,00	100	18,0-20,0	8,0-12,0	0,045	0,03	
304LN	0,03	2,00	100	18,0-20,0	8,0-12,0	0,045	0,03	0,10-0,16N
302Cu	0,08	2,00	100	17,0-19,0	8,0-10,0	0,045	0,03	3,0-4,0Cu
304N	0,08	2,00	100	18,0-20,0	8,0-10,5	0,045	0,03	0,10-0,16N
305	0,12	2,00	100	17,0-19,0	10,5-13,0	0,045	0,03	
308	0,08	2,00	100	19,0-21,0	10,0-12,0	0,045	0,03	
309	0,20	2,00	100	22,0-24,0	12,0-15,0	0,045	0,03	
309S	0,08	2,00	100	22,0-24,0	12,0-15,0	0,045	0,03	
310	0,25	2,00	1,50	24,0-26,0	19,0-22,0	0,045	0,03	
310S	0,08	2,00	1,50	24,0-26,0	19,0-22,0	0,045	0,03	
314	0,25	2,00	1,5-3,0	23,0-26,0	19,0-22,0	0,045	0,03	
316	0,08	2,00	100	16,0-18,0	10,0-14,0	0,045	0,03	2,0-3,0Mo
316F	0,08	2,00	100	16,0-18,0	10,0-14,0	0,20	0,10min	1,75-2,5Mo
316H	0,04-0,10	2,00	100	16,0-18,0	10,0-14,0	0,045	0,03	2,0-3,0Mo
316L	0,03	2,00	100	16,0-18,0	10,0-14,0	0,045	0,03	2,0-3,0Mo
316LN	0,03	2,00	100	16,0-18,0	10,0-14,0	0,045	0,03	2,0-3,0Mo;0,10-0,16N
316N	0,08	2,00	100	16,0-18,0	10,0-14,0	0,045	0,03	2,0-3,0Mo;0,10-0,16N
317	0,08	2,00	100	18,0-20,0	11,0-15,0	0,045	0,03	3,0-4,0Mo
317L	0,03	2,00	100	18,0-20,0	11,0-15,0	0,045	0,03	3,0-4,0Mo
321	0,08	2,00	100	17,0-19,0	9,0-12,0	0,045	0,03	5x% C min Ti
321H	0,04-0,10	2,00	100	17,0-19,0	9,0-12,0	0,045	0,03	5x% C min Ti
330	0,08	2,00	0,75-1,5	17,0-20,0	34,0-37,0	0,04	0,03	
347	0,0,8	2,00	100	17,0-19,0	9,0-13,0	0,045	0,03	10x%C min Nb
347H	0,04-0,10	2,00	100	17,0-19,0	9,0-13,0	0,045	0,03	8x%Cmin-1,0max-Nb
348	0,08	2,00	100	17,0-19,0	9,0-13,0	0,045	0,03	0,2Co;10x%C
348H	0,04-0,10	2,00	100	17,0-19,0	9,0-13,0	0,045	0,03	
384	0,08	2,00	100	15,0-17,0	17,0-19,0	0,045	0,03	



Anexo 2. Algoritmo en pseudocódigo desarrollado en Scilab 5.5.2.

```

clear all

clear

clc

//
=====
== //
// ===== FACTORES DE CONVERSION DEL SISTEMA INGLES AL SISTEMA INTERNACIONAL ===== //
//
=====
== //

in = 0.0254      // Pulgadas a metros
lb=0.454        // Libras a Kg
rpm = 2*%pi/(60) // RPM a rad/s
g=9.81         // Gravedad en m/s^2
lbf=lb*g       // Libras Fuerza
psi=lbf/(in^2) // Psi en el sistema SI
ksi=1000*psi   // Ksi en el sistema SI
MPa= 1*1e6     // Mega Pascal en Pascal
Ton=1*1e3     // Ton a Kg

//
=====
== //
//
=====
== //

//
=====
== //
// ===== DATOS DEL PROBLEMA ===== //
//
//
=====
== //

disp("CALCULO DE RESISTENCIA MECANICA DEL AISI 304L ANTE CONDICIONES DE DISEÑO")
disp(" ")
di = 3.18      // Diametro Interno [m]
d_o = di + 2*8*1e-3 // Diametro Externo [m]
t = 10.38*1e-3 // Espesor del tanque [m]
P = 50*psi     // Presion de almacenamiento [Pa]
GE_MVC = 1.38 // Gravedad Especifica del MVC
GE_TCE = 1.47 // Gravedad Especifica del Tricloroetileno
GE_ADV = 0.9  // Gravedad Especifica del Acetato de Vinilo
rho = (0.7 + 0.1*GE_MVC + 0.1*GE_TCE + 0.1*GE_ADV) * 1000 // Densidad del fluido [Kg/m^3]
h = 0.7*di    // Altura del fluido [m]
Pf = (P + rho*g*h)/ MPa // Presion en el fondo del tanque [MPa]

//
=====
== //

```



```
//
=====
== //

//
=====
== //
//===== PROPIEDADES DEL MATERIAL =====//
//
=====
== //

// MATERIAL: AISI 304L (Tomado de http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MQ304L)

Sy=210
disp("Esfuerzo a la Fluencia del AISI 304L [MPa]: ")
disp(Sy)
disp(" ")

Sut=564
disp("Esfuerzo a la Traccion del AISI 304L [MPa]: ")
disp(Sut)
disp(" ")

Sf=(Sy+Sut)/2
disp("Stress Flow [MPa]: ") // Tomado del API 579 Anexo F 2.2.2. en concordancia con el codigo ASME Section 7,
Division 2 para aceros inoxidables austeniticos.
disp(Sf)
disp(" ")

//
=====
===== //
//
=====
===== //
//
=====
===== /

function sg=Tensor()
sl= (Pf*(di/4))
disp("Esfuerzo Normal debio a la Presion Interna [MPa]: ")
disp(sl)

st = Pf*(di+t)/(2*t)
disp("Esfuerzo Tangencial debio a la Presion Interna [MPa]: ")
disp(st)
disp(" ")

sg=[sl, 0, 0;
    0, 0, 0;
    0, 0, st]
endfunction

function svm=VonMisses()
sg=Tensor()
[R,DD]=spec(sg)
s1=DD(1,1)
```



```

s2=DD(2,2)
s3=DD(3,3)
svm=sqrt(((s1-s2)^2+(s2-s3)^2+(s3-s1)^2)/2)
endfunction

//
=====
== //
// ===== CALCULOS DEL PROBLEMA =====
//
//
=====
== //

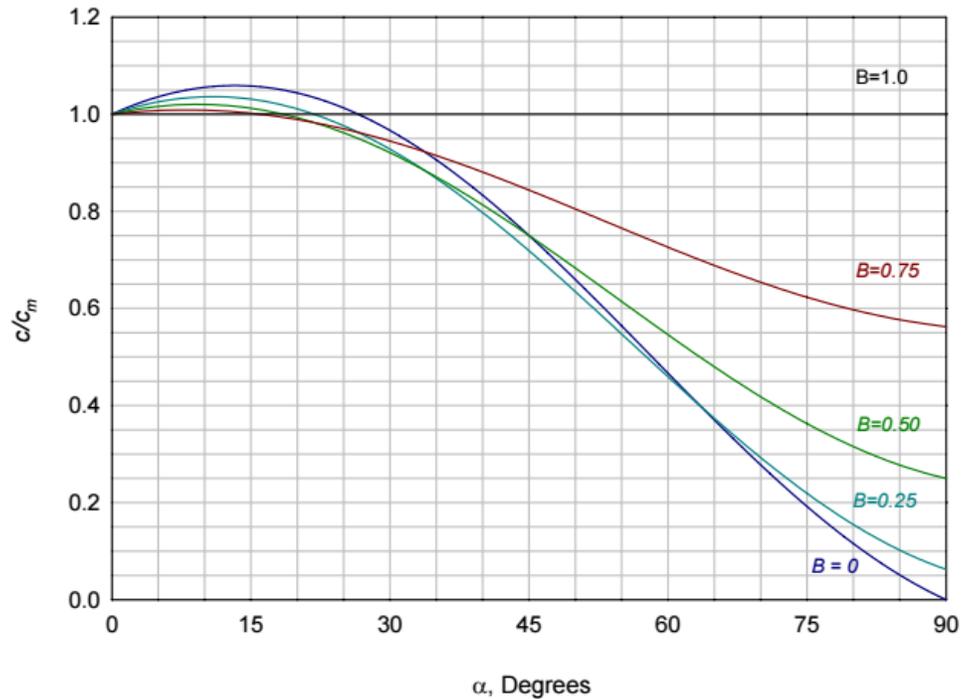
Vm = VonMises() // Esfuerzo de Von Misses [MPa]
disp("Esfuerzo de Von Misses deterministico [MPa]")
disp(Vm)
disp(" ")

FS = Sf/Vm // Factor Seguridad
disp("Factor de Seguridad Deterministico [Comparado con Sf] (FS)")
disp(FS)
disp(" ")

//
=====
== //
//
=====
== //

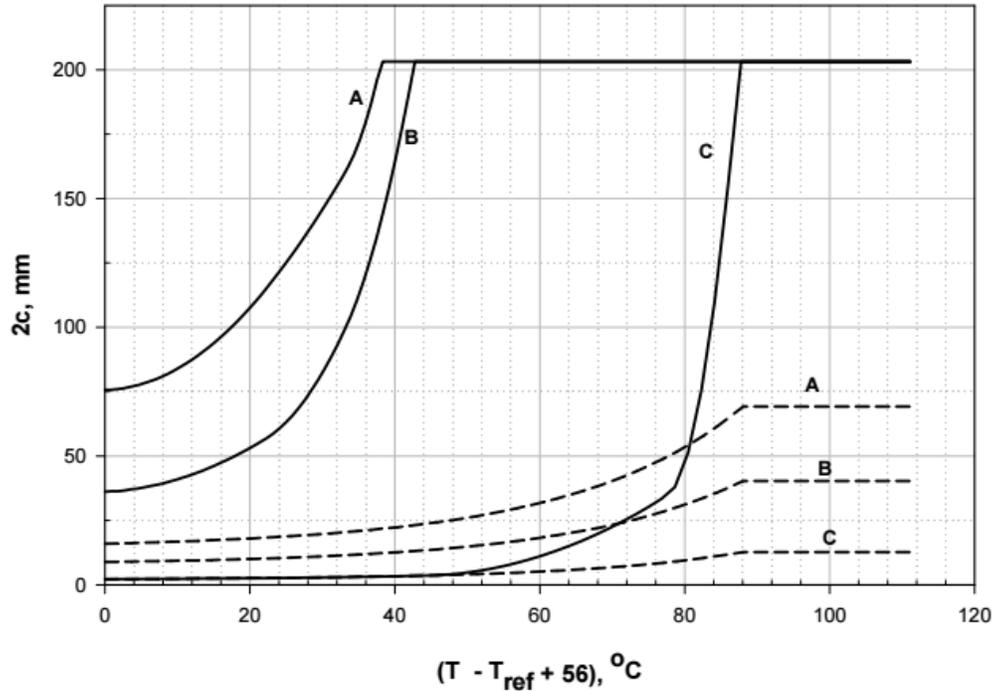
```

Anexo 3. Figure 9.3. Norma API 579/FFS-1. Selección de relaciones en las dimensiones de la longitud de la grieta.





Anexo 4. Figure 9.15M. Norma API 579/FFS-1. Selección de Longitud permisible bajo el criterio de la norma.

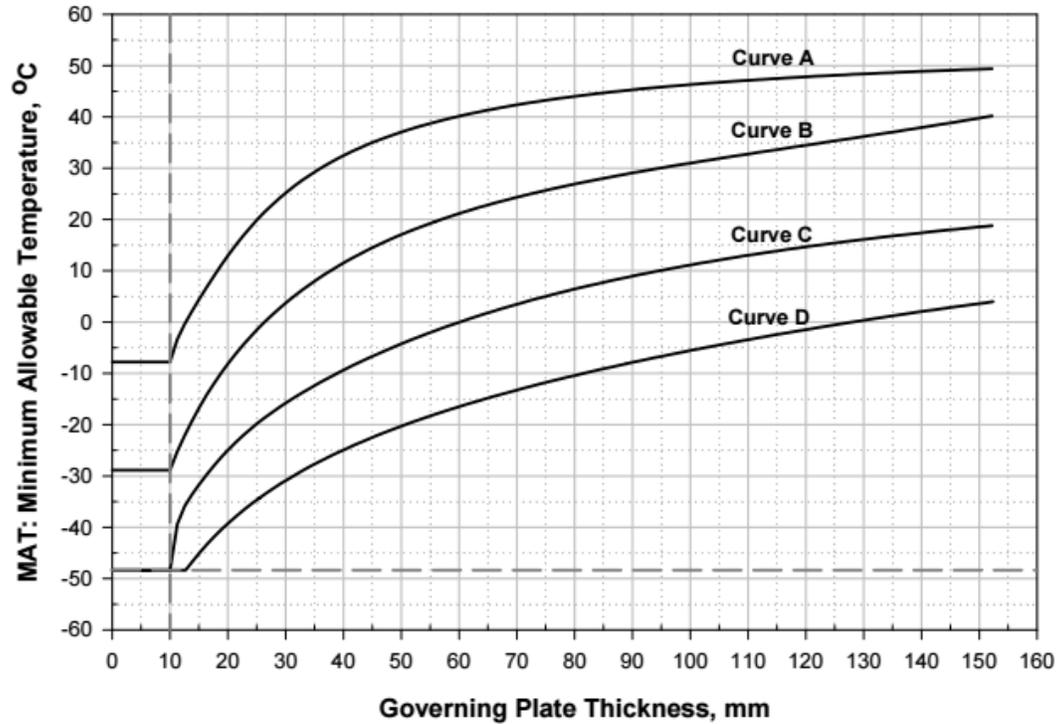


Anexo 5. Figure 9.15M. Norma API 579/FFS-1. Selección de la curva para realizar la selección de la figura 3.4

Curve	Material (1), (2), (6)
A	<ol style="list-style-type: none"> All carbon and all low alloy steel plates, structural shapes and bars not listed in Curves B, C, and D below. SA-216 Grades WCB and WCC if normalized and tempered or water-quenched and tempered; SA -217 Grade WC6 if normalized and tempered or water-quenched and tempered The following specifications for obsolete materials: A7, A10, A30, A70, A113, A149, A150 (3). The following specifications for obsolete materials from the 1934 edition of the ASME Code, Section VIII: S1, S2, S25, S26, and S27 (4). A201 and A212 unless it can be established that the steel was produced by a fine-grain practice (5)
B	<ol style="list-style-type: none"> SA-216 Grades WCA if normalized and tempered or water-quenched and tempered SA-216 Grades WCB and WCC for thicknesses not exceeding 2 inches if produced to a fine grain practice and water-quenched and tempered SA -217 Grade WC9 if normalized and tempered SA-285 Grades A and B SA-414 Grade A SA-442 Grade 55>1 in. if not to fine grain practice and normalized SA-442 Grade 60 if not to fine grain practice and normalized SA-515 Grades 55 and 60 SA-516 Grades 65 and 70 if not normalized SA-612 if not normalized SA-662 Grade B if not normalized Except for cast steels, all materials of Curve A if produced to fine grain practice and normalized which are not listed for Curve C and D below; All pipe, fittings, forgings, and tubing not listed for Curves C and D below; Parts permitted from paragraph UG-11 of the ASME Code, Section VIII, Division 1, shall be included in Curve B even when fabricated from plate that otherwise would be assigned to a different curve. A201 and A212 if it can be established that the steel was produced by a fine-grain practice.



Anexo 6. Figure 9.15M. Norma API 579/FFS-1. Selección de la temperatura para realizar el cálculo de la temperatura de referencia





REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACERIND S.C. (n.d.). SOLDADURA DE LOS ACEROS INOXIDABLES. Retrieved March 23, 2016, from <http://www.cientificosaficionados.com/libros/solinox1.pdf>
- Anderson, T. L., & Osage, D. a. (2001). API 579: A comprehensive fitness-for-service guide. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 77(14-15), 953–963. [http://doi.org/10.1016/S0308-0161\(01\)00018-7](http://doi.org/10.1016/S0308-0161(01)00018-7)
- Antonio, A., Basurto, J., & Gallegos, A. (2015). TANQUE DE ALMACENAMIENTO A PRESIÓN. Retrieved March 23, 2016, from <https://prezi.com/4ua3at4h0myr/tanque-de-almacenamiento-a-presion/>
- API 579-1/ASME FFS-1. (2007). *API 579-1/ASME FFS-1*.
- Brown Mc Falarne. (n.d.). Acero inoxidable - Tipos 304 y 304L | Stainless Steel Plate | Products. Retrieved March 23, 2016, from <http://www.brownmac.com/products/stainless-steel-plate/304-and-304l-spanish.aspx>
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2012). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley* (Novena). McGraw-Hill.
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna* (Tercera). McGraw-Hill.
- Guzmán, L. J. (2006). *Diseño Mecánico de Recipientes a Presión bajo el Código ASME Sección VIII, División I*. Universidad Simón Bolívar.
- Herrera García, E. C. (2014). *Estudio de la Integridad Estructural de Tuberías Fisuradas Aplicando Simulación por Elementos Finitos en el Marco de la Norma API 579*. Pontificia Universidad Católica de Perú. Retrieved from http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/1250/ROMANI_OJEDA_JOSE_COMUNICACION_MULTIMEDIA_HOSPITAL.pdf?sequence=1
- INDURA. (2010). *CATÁLOGO DE ACEROS INOXIDABLES*. Retrieved from http://www.indura.net/_file/file_1774_manualdeacerosinoxidables_indura.pdf
- Ingeniería y Ensayos del Caribe S.A.S. (2015). *Informe Técnico: EVALUACIÓN DE INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DEL TANQUE T-2013*. Cartagena, Colombia.
- Jafari, M. K., & Wickerson, S. (2012). FITNESS FOR SERVICE ASSESSEMENT FOR CRYSTALLIZERS WITH CRACK LIKE FLAWS. *6th Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition, Oct 7-12, 2012, Kingdom of Bahrain*.



- Lam, P., Sindelar, R. L., & Duncan, A. J. (2014). A FRAMEWORK TO DEVELOP FLAW ACCEPTANCE CRITERIA FOR STRUCTURAL INTEGRITY ASSESSMENT OF MULTIPURPOSE CANISTERS FOR EXTENDED STORAGE OF USED NUCLEAR FUEL. *Proceedings of the ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Division Conference*.
- Mexichem. (2008). *Hoja de seguridad para el manejo del pvc*. Cartagena, Colombia. Retrieved from www.mexichem.com/resinascolombia
- NACE. (n.d.). Corrosion Basics. Retrieved March 14, 2016, from <http://nace.org/Corrosion-Central/Corrosion-101/Corrosion-Basics/>
- NACE INTERNATIONAL - THE CORROSION SOCIETY. (2004). *Curso de Corrosión Básica, Manual del Estudiante*.
- Nguyen, N., & Beer, E. De. (2013). Fitness-for-service and defect tolerance assessment – solutions for cracked components to remain in service. *Australasian Welding Journal*, 58, 42–48.
- Pacheco, C., & Palencia, A. (2008). *Estado del Arte de la Automatización en Planta 2 MEXICHEM Resinas Colombia*. Universidad Tecnológica de Bolívar.
- Revie, R. W., & Uhlig, H. H. (2008). *Corrosion and Corrosion Control. An introduction to Corrosion Science and Engineering. CORROSION AND CORROSION CONTROL An Introduction to Corrosion Science and Engineering*. A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION.
- Roberge, P. R. (2008). *Corrosion Engineering. Principles and practice* (1st ed.). McGraw-Hill. <http://doi.org/10.1036/0071482431>
- Sanzi, H. C. (2011). Evaluación de la integridad estructural de un componente contenedor de presión. Aplicación de los códigos para el diseño y servicio estudio de casos. *Universidad Tecnológica Nacional FRH*, 1–11.
- Saxon, M. (2013). *MATERIAL SPECIFIC LOAD COMBINATION FACTORS FOR OPTION 2 FAD CURVES*. Cleveland State University. Retrieved from http://academic.csuohio.edu/duffy_s/Matt_Schaser_Thesis_Final_Draft.pdf
- Sindelar, R. L., & Lam, P. (2015). DEVELOPMENT OF FLAW ACCEPTANCE CRITERIA FOR AGING MANAGEMENT OF SPENT NUCLEAR FUEL MULTIPLE-PURPOSE CANISTERS. Massachusetts: Pressure Vessels and Piping Division. Retrieved from <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=2472177>