

**ANÁLISIS DE CAUSAS DE FALLAS DE LA PIEZA DE TRANSICIÓN DEL  
REACTOR PARA LA OBTENCIÓN DE NEGRO HUMO EN CABOT  
COLOMBIANA S.A.**

**ÁLVARO DAVID DÍAZ FRAGOZO  
JESÚS ALBERTO TURIZO FÚQUENEZ**

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

**2015**

**ANÁLISIS DE CAUSAS DE FALLAS DE LA PIEZA DE TRANSICIÓN DEL  
REACTOR PARA LA OBTENCIÓN DE NEGRO HUMO EN CABOT  
COLOMBIANA S.A.**

**ÁLVARO DAVID DÍAZ FRAGOZO  
JESÚS ALBERTO TURIZO FÚQUENEZ**

**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.**

**Cartagena D. T. y C., 16 de julio de 2015**

Señores

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**

Facultad de Ingeniería Mecánica

Comité Evaluador de Trabajos de Grado

Cordial Saludo.

Por medio de la presente nos permitimos someter a su consideración el trabajo de grado titulado “**ANÁLISIS DE CAUSAS DE FALLAS DE LA PIEZA DE TRANSICIÓN DEL REACTOR PARA LA OBTENCIÓN DE NEGRO HUMO EN CABOT COLOMBIANA S.A.**”, de los estudiantes **ÁLVARO DAVID DÍAZ FRAGOZO** y **JESÚS ALBERTO TURIZO FÚQUENEZ**, para optar por el título de Ingeniero Mecánico.

Cordialmente,

---

**ÁLVARO DAVID DÍAZ FRAGOZO**

C.C. 1.067.726.467

---

**JESÚS ALBERTO TURIZO FÚQUENEZ**

C.C. 1.143.374.404

**Cartagena D. T. y C., 16 de julio de 2015**

Señores

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**

Facultad de Ingeniería Mecánica

Comité Evaluador de Trabajos de Grado

Cordial Saludo.

Por medio de la presente nos permitimos someter a su consideración el trabajo de grado titulado “**ANÁLISIS DE CAUSAS DE FALLAS DE LA PIEZA DE TRANSICIÓN DEL REACTOR PARA LA OBTENCIÓN DE NEGRO HUMO EN CABOT COLOMBIANA S.A.**”, de los estudiantes **ÁLVARO DAVID DÍAZ FRAGOZO** y **JESÚS ALBERTO TURIZO FÚQUENEZ**, en el que me desempeño como director.

Cordialmente,

---

**PhD. LUIS MARCOS CASTELLANOS GONZÁLEZ**

Director de trabajo de grado

Nosotros, ÁLVARO DAVID DÍAZ FRAGOZO y JESÚS ALBERTO TURIZO FÚQUENEZ, mayores de edad y domiciliados en la ciudad de Cartagena D. T. y C. e identificados como consta al pie de la presente, de manera libre y espontánea, manifestamos en Este documento nuestra 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 “**ANÁLISIS DE CAUSAS DE FALLAS DE LA PIEZA DE TRANSICIÓN DEL REACTOR PARA LA OBTENCIÓN DE NEGRO HUMO EN CABOT COLOMBIANA S.A.**” producto de nuestra actividad académica para optar al 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 nos 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.

Dado en la ciudad de Cartagena de Indias D. T. y C., a los 16 días del mes de Julio de 2015.

---

ÁLVARO DAVID DÍAZ FRAGOZO  
C.C. 1.067.726.467

JESÚS ALBERTO TURIZO FÚQUENEZ  
C.C. 1.143.374.404



## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

Firma del Presidente del Jurado

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

Cartagena de Indias D.T. y C., 16 de Julio de 2015

## DEDICATORIA ÁLVARO DÍAZ

*A Dios gracias por permitirme alcanzar esta meta, la cual se convierte en punto de partida para nuevos objetivos.*

*A mis padres, Álvaro Díaz y Gladys Fragozo, por el apoyo constante e incansable que me brindaron a lo largo de mi formación académica.*

*A mi hermana, Glenia Vega Fragozo, quien ha sido apoyo incondicional durante mi vida y todo este proceso.*

*A nuestro director, PhD Luis Marcos Castellanos, quien con su asesoría fue parte fundamental para el desarrollo de esta investigación.*

*A mi compañero Jesús Turizo por su acompañamiento durante el progreso de este trabajo.*

*A cada una de las personas que de manera directa e indirecta coadyuvaron en este logro.*

**Álvaro D. Díaz Fragozo**

## **DEDICATORIA JESÚS TURIZO**

*A Dios por darme la vida, por protegerme,  
darme esta gran oportunidad de cumplir  
este sueño y llevarme siempre  
por el buen camino.*

*A mis padres por el apoyo incondicional  
y por estar siempre comprendiendo  
mis problemas y celebrando  
mis triunfos.*

*A nuestro director, PhD Luis Marcos Castellanos,  
quien con su asesoría fue parte fundamental  
para el desarrollo de esta investigación.*

*A mi compañero Álvaro Díaz por  
su acompañamiento durante  
el progreso de este trabajo.*

*A aquellas personas que de una  
u otra manera influyeron en mi proceso  
de formación profesional a lo  
largo de toda mi carrera.*

**Jesús A. Turizo Fúquenez**

## AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestros agradecimientos a:

**PhD. Luis Marcos Castellanos**, por todo el apoyo y conocimientos que incondicionalmente nos brindó durante nuestra formación como estudiantes de pregrado. Sus instrucciones y recomendaciones fueron de vital importancia para el desarrollo de la investigación y ante todo su entrega y disponibilidad para llevar a cabo este proceso; asimismo agradecemos la confianza puesta en nosotros para permitirnos apoyarlo en esta investigación.

A todos los docentes de la Universidad Tecnológica de Bolívar que contribuyeron en nuestra formación como profesionales.

Al Ingeniero **Isaac Polo**, por su apoyo incondicional desde la empresa **CABOT COLOMBIANA S.A.**, quien mostró total disposición para proveernos la información requerida para el desarrollo de este trabajo.

A la empresa **INGENIERÍA Y ENSAYOS DEL CARIBE S.A.S.**, quien nos apoyó con la realización de ensayos y análisis de gran importancia para obtener los resultados plasmados en la investigación.

## TABLA DE CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| <b>LISTADO DE FIGURA</b> .....  | 12 |
| <b>LISTADO DE TABLAS</b> .....  | 13 |
| <b>LISTADO DE GRÁFICAS</b> .....  | 14 |
| <b>INTRODUCCIÓN</b> .....   | 15 |
| <b>JUSTIFICACIÓN</b> .....  | 16 |
| <b>OBJETIVO GENERAL</b> .....   | 17 |
| <b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....  | 18 |
| <b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....   | 19 |
| <b>1. ESTADO DEL ARTE</b> .....   | 20 |
| 1.1 CABOT CORPORATION INC. ....   | 20 |
| 1.2. PROCESO DE OBTENCIÓN DEL NEGRO DE HUMO .....   | 21 |
| 1.2.1. Arotar .....   | 21 |
| 1.2.2. Negro de humo.....   | 21 |
| 1.2.3. Definición del proceso y sus etapas por cabot corporation .....  | 23 |
| 1.2.4. Componentes de las etapas del proceso .....  | 24 |
| 1.3 PARÁMETROS Y LINEAMIENTOS DEL PROCESO .....   | 26 |
| 1.4. MATERIAL DE FABRICACIÓN DE LAS PARTES DEL REACTOR .....  | 29 |
| 1.4.1. Aceros inoxidables y su clasificación.....   | 30 |
| 1.4.2. Beneficios y propiedades de los aceros inoxidables .....   | 31 |
| 1.4.3. Aceros inoxidables utilizados en la fabricación de las partes del reactor según requerimientos de diseño CABOT CORPORATION INC. .... | 33 |
| 1.4.4. Aceros inoxidables utilizados de forma alternativa para la fabricación de reactores .....  | 34 |
| 1.5. TIPOS DE CORROSIÓN EN ACEROS INOXIDABLES .....   | 35 |
| 1.5.1. Corrosión general .....  | 35 |
| 1.5.2 Corrosión galvánica .....   | 36 |
| 1.5.3. Corrosión por picaduras e intersticio .....  | 37 |
| 1.5.4. Corrosión Intergranular .....  | 38 |
| 1.5.5. Corrosión bajo tensión .....   | 39 |

|   |           |
|---|-----------|
| 1.6. SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS INOXIDABLES.....  | 42        |
| 1.6.1. Principales problemas relacionados con la soldadura de los aceros<br>inoxidables .....                   | 45        |
| 1.7. INSPECCIÓN Y ENSAYOS .....   | 47        |
| 1.7.1. Ensayos no destructivos .....  | 47        |
| 1.7.2. Técnicas de caracterización de los materiales .....  | 51        |
| 1.7.3 Análisis por el método de Elementos Finitos .....   | 52        |
| <b>2. ANÁLISIS DE FALLAS .....</b>  | <b>53</b> |
| 2.1. EXAMEN VISUAL Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.....   | 53        |
| 2.2. INSPECCIÓN ULTRASÓNICA.....  | 57        |
| 2.3. ANÁLISIS METALOGRÁFICO .....   | 58        |
| 2.4. ANÁLISIS QUÍMICO .....   | 62        |
| 2.5 ANÁLISIS TENSIONAL A TRAVÉS DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS<br>(MEF) UTILIZANDO EL SOFTWARE SOLID EDGE..... | 62        |
| <b>3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....</b>  | <b>65</b> |
| <b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>  | <b>66</b> |
| <b>5. BIBLIOGRAFÍA .....</b>  | <b>67</b> |

## LISTADO DE FIGURA

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.</b> Empresas de Cabot Corp. en el mundo.....  | 20 |
| <b>Figura 2.</b> Etapas o zonas del proceso.....   | 23 |
| <b>Figura 3.</b> Esquema de la pieza de transición.....  | 25 |
| <b>Figura 4.</b> Agotamiento de cromo en los límites de grano, Sensibilización.....  | 39 |
| <b>Figura 5.</b> Aspecto típico de la presencia de SCC.....  | 40 |
| <b>Figura 6.</b> Configuración <i>Phased Array</i> Lineal.....   | 49 |
| <b>Figura 7.</b> Configuración <i>Phased Array</i> sectorial.....  | 50 |
| <b>Figura 8.</b> Técnica complementaria TOFD.....  | 51 |
| <b>Figura 9.</b> Pieza de transición.....  | 53 |
| <b>Figura 10.</b> Vista por la zona de reacción. Evidencia de grieta.....  | 54 |
| <b>Figura 11.</b> Evidencia de deformación plástica hacia el interior del reactor.....   | 55 |
| <b>Figura 12.</b> Zona de extracción con la grieta.....  | 55 |
| <b>Figura 13.</b> Vista de la grieta por la zona interior del acero AISI 316 Soldado y que hace contacto la zona de reacción del Arotar a elevadas temperaturas.....                                 | 56 |
| <b>Figura 14.</b> Corte perpendicular a la grieta vista en la figura 12. Muestra la zona del metal de aporte, la grieta y el metal base a la derecha.....  | 57 |
| <b>Figura 15.</b> Micrografía con 50 X mostrando la zona agrietada del lado la zona de enfriamiento por agua.....  | 59 |
| <b>Figura 16.</b> Micrografía con 50 X mostrando la zona agrietada del lado la zona de reacción caliente.....  | 60 |
| <b>Figura 17.</b> Micrografía a 100 X del metal base de acero inoxidable, con grietas intercristalinas formadas mediante SCC (Stress Corrosion Cracking).....  | 60 |
| <b>Figura 18.</b> Micrografía a 100 X del metal base de acero inoxidable, mostrando en avance de las grietas intercristalinas formadas mediante el mecanismo de SCC (Stress Corrosion Cracking)..... | 61 |
| <b>Figura 19.</b> Micrografía con 100 X, mostrando grietas intercristalinas formadas en zonas del acero inoxidable que están en contacto con los procesos de reacción, alejadas del cordón.....      | 61 |
| <b>Figura 20.</b> Resultados obtenidos a través de la simulación generada en el software Solid Edge de los estados tensionales de la pieza de transición.....  | 63 |
| <b>Figura 21.</b> Evidencia de fallo en simulación realizada en el programa NX9.....   | 64 |

## LISTADO DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1.</b> Propiedades del arotar suministrado por ECOPETROL. ....                | 21 |
| <b>Tabla 2.</b> Valores de flujo con relación a tamaño de transiciones. ....           | 28 |
| <b>Tabla 3.</b> Composiciones y propiedades típicas de los aceros inoxidables. ....    | 33 |
| <b>Tabla 4.</b> Composición nominal de los aceros inoxidables austeníticos 316 L. .... | 34 |
| <b>Tabla 5.</b> Composición química del acero inoxidable AISI 304. ....                | 35 |
| <b>Tabla 6.</b> Recomendaciones para la soldadura de aceros inoxidables. ....          | 44 |
| <b>Tabla 7.</b> Muestra de material del lado afectado. ....                            | 62 |
| <b>Tabla 8.</b> Muestra de material del lado contrario. ....                           | 62 |

## LISTADO DE GRÁFICAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Gráfica 1.</b> Caída de presión vs. Velocidad de flujo para diversos Componentes del quemador refrigerados por agua. ....                   | 29 |
| <b>Gráfica 2.</b> Serie galvánica en agua de mar. ....   | 37 |
| <b>Gráfica 3.</b> Umbral de agrietamiento de aleaciones 304 y 316 expuestas cerca de aguas con contenido de cloruro. ....                      | 42 |
| <b>Gráfica 4.</b> Representación gráfica de los extremos de la grieta. Con el equipo se evidencia que cubre todo el espesor de la lámina. .... | 58 |
| <b>Gráfica 5.</b> Defectos asociados a falta de penetración en la raíz de los cordones. ....   | 58 |

## INTRODUCCIÓN

El sistema para la obtención de negro de humo de **CABOT COLOMBIANA S.A.** está compuesto principalmente por tres equipos, los cuales designan las etapas del proceso; estos son: el quemador, el reactor y el intercambiador de calor. El sistema comprende una pieza cónica adyacente al reactor, la cual funciona como conexión entre este último y el quemador, y contiene el anillo de aceite, en el cual se encuentran ubicados los orificios de inyección del combustible de alimentación (arotar), este equipo subalterno responde al nombre de pieza de transición. Esta pieza, fabricada en acero inoxidable al igual que los demás equipos del sistema, ha venido presentando una serie de fallas, las cuales se han traducido en paradas inesperadas de la planta.

El desarrollo de esta investigación se basa en el estudio de las causas de fallas de la pieza de transición en el sistema para la obtención del negro de humo en la empresa **CABOT COLOMBIANA S.A.**. En este trabajo se evidencian y analizan los efectos generados por la falla presentada en este equipo, con la finalidad de determinar las causas que provocaron este fenómeno. La metodología de este proceso de análisis de causa se basa en realizar en primera instancia inspección visual, seguida de un ensayo no destructivo (prueba de ultrasonido), análisis metalográfico y químico y un estudio a través del método de elementos finitos para diagnosticar el estado tensional de la pieza.

## **JUSTIFICACIÓN**

Actualmente CABOT COLOMBIANA S.A. viene sufriendo presencia de grietas en una de las piezas de transición del sistema para la obtención del negro de humo, utilizado como agente de refuerzo predominante para mejorar el procesamiento, la resistencia y la durabilidad de los compuestos basados en elastómeros en la mayoría de las aplicaciones de caucho; lo que se traduce en una parada de planta inesperada y pérdidas en la producción. Por tal motivo se desarrolla esta investigación y análisis de la problemática con el propósito de precisar sobre la causa principal de la falla y mitigar los efectos de este fenómeno.

Se pretende establecer un modelo de solución y prevención de este tipo de fallas presentes en equipos homólogos, en cuanto a su funcionalidad, medio de trabajo, material de fabricación y agentes que intervienen en el proceso donde figura la actividad del equipo

## **OBJETIVO GENERAL**

Establecer la causa principal de la falla en la pieza de transición a través del análisis de la zona y el material de la pieza.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Conceptualizar los aspectos relacionados con el proceso de obtención de negro de humo.
- Realizar inspección visual y ensayos no destructivos (Ultrasonido) de las partes de la pieza de transición del reactor que presentó fallas.
- Desarrollar un análisis microestructural por microscopía óptica a la zona de falla con la finalidad de evaluar las microestructuras del acero y el modo de falla.
- Desarrollar análisis químico del acero para comprobar si cumple con lo establecido en los requerimientos de diseño.
- Aplicar el MEF para evaluar los estados tensionales en la zona de falla.
- Elaboración de una ponencia a un evento científico.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

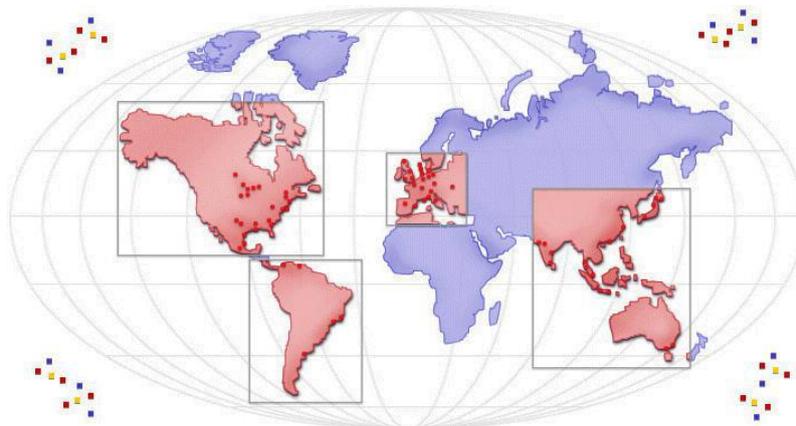
La pieza de transición del sistema para la obtención de Negro de humo de la empresa CABOT COLOMBIANA S.A., ha presentado grietas en la unión soldada del acero inoxidable de la pared interior que está entre la zona de baja temperatura, de enfriamiento y la zona de alta temperatura de reacción por combustión del Arotar lo que provocó una parada no planificada. El problema consiste en determinar las causas que han provocado esta falla y proponer algunas alternativas para evitar este fenómeno.

## 1. ESTADO DEL ARTE

### 1.1 CABOT CORPORATION INC.

Cabot Corporation (NYSE: CBT) es una empresa líder mundial en químicos de especificación y materiales de rendimiento cuya sede principal está en Boston, Massachusetts, Estados Unidos, dedicada a la producción de caucho y carbonos de especificación, salmueras de formiato de cesio, carbón activo, aerogel, químicos de cesio finos, óxidos metálicos pirógenos, grafenos, colorantes de inyección de tinta, concentrados de color y compuestos conductores.

CABOT COLOMBIANA S.A. se encuentra situada en la ciudad de Cartagena (Bolívar), a la altura del km 12 vía Mamonal, apartado aéreo 2903.



**Figura 1.** Empresas de Cabot Corp. en el mundo<sup>1</sup>

Como clientes nacionales atiende directamente sectores de la industria de Llantas (Tires), Productos Industriales (IP) y Tintas y Pinturas (PPBG). Igualmente atiende un vasto sector del mercado industrial del caucho a través de sus distribuidores autorizados. El mercado de exportación está conformado por operaciones intercompany fundamentalmente hacia las plantas de Cabot en Brasil, Argentina, Asia Pacífico y Europa, las cuales se encargan de comercializar el producto, o por exportaciones directas principalmente a clientes de Norte, Centro, Suramérica y las mismas Asia Pacífico y Europa.

<sup>1</sup> Registros de Cabot Colombia S.A.

## 1.2. PROCESO DE OBTENCIÓN DEL NEGRO DE HUMO

### 1.2.1. Arotar

El arotar, también denominado alquitrán aromático, es uno de los productos residuales obtenidos en los procesos de ruptura catalítica. Se usa especialmente como materia prima para la elaboración del negro de humo utilizado en la industria de llantas. Puede utilizarse también como diluyente del combustóleo. El arotar es un producto químicamente estable; sin embargo, en su manejo debe evitarse el contacto con la piel, debido a que hay sospecha de que puede causar carcinogénesis.

La tabla 1 muestra las propiedades del arotar suministrado por ECOPETROL a la empresa CABOT COLOMBIA S.A. como materia prima para el desarrollo del proceso de obtención del negro de humo.

| <b>Arotar (alquitrán aromático)</b> |           |                     |                |        |
|-------------------------------------|-----------|---------------------|----------------|--------|
| PROPIEDADES / CARACTERÍSTICAS       | UNIDADES  | MÉTODO              | ESPECIFICACIÓN |        |
|                                     |           | ASTM                | Mínimo         | Máximo |
| Contenido de cenizas                | g/100 g   | ASTM D482           |                | 0,14   |
| Gravedad API                        | °API      | ASTM D4052 (1)      |                | 3      |
| Azufre                              | g/100g    | ASTM D4294 (2)      | Reportar       |        |
| Agua y sedimento                    | ml/100 ml | ASTM D1796          |                | 0,5    |
| Índice de correlación BMCI          | °C        | Bureau of Mines USA | 110            |        |
| Flash Point                         | °C        | ASTM D93            | 48             |        |

**Notas:**

(1) Método alterno ASTM D-287 o D-1298

(2) Método alterno ASTM D-2622

**Tabla 1.** Propiedades del arotar suministrado por ECOPETROL.<sup>2</sup>

### 1.2.2. Negro de humo

El negro de humo es uno de los productos obtenidos a partir de los hidrocarburos provenientes del petróleo. Este producto es considerado como

<sup>2</sup> [http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Catalogo\\_de\\_Productos/pdf/Ecopetrol%20Arotar%20VSM-01.pdf](http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Catalogo_de_Productos/pdf/Ecopetrol%20Arotar%20VSM-01.pdf)

un carbón químicamente puro, su producción es llevada a cabo en distintos reactores que poseen cada uno una distribución y estructura especial, los cuales permiten realizar en ellos una descomposición térmica de un hidrocarburo utilizado como materia prima, su producción se caracteriza por arrojar una amplia distribución de tamaños en las partículas de negro de humo.

El tamaño de las partículas obtenidas en el proceso de producción es lo que indica el valor del producto, entre más pequeña sea la partícula es más costoso el producto. Su tamaño varía entre 10 hasta 500  $\mu\text{m}$  (milésima parte de una micra que a su vez es la milésima parte de un milímetro).

Antes de 1945, el negro de humo se fabricaba a partir del gas natural usando cualquiera de los tres procesos mencionados. Después de esta fecha se modificó el proceso de horno para de esta forma poder usar hidrocarburos líquidos como materia prima, y actualmente es el que más se usa. Los hidrocarburos que se utilizan como carga son desde gasóleos hasta residuos pesados. En general, estas cargas deben tener un alto porcentaje de aromáticos pesados o poliaromáticos, y un bajo contenido de azufre. Además deben producir un mínimo de ceniza mineral.

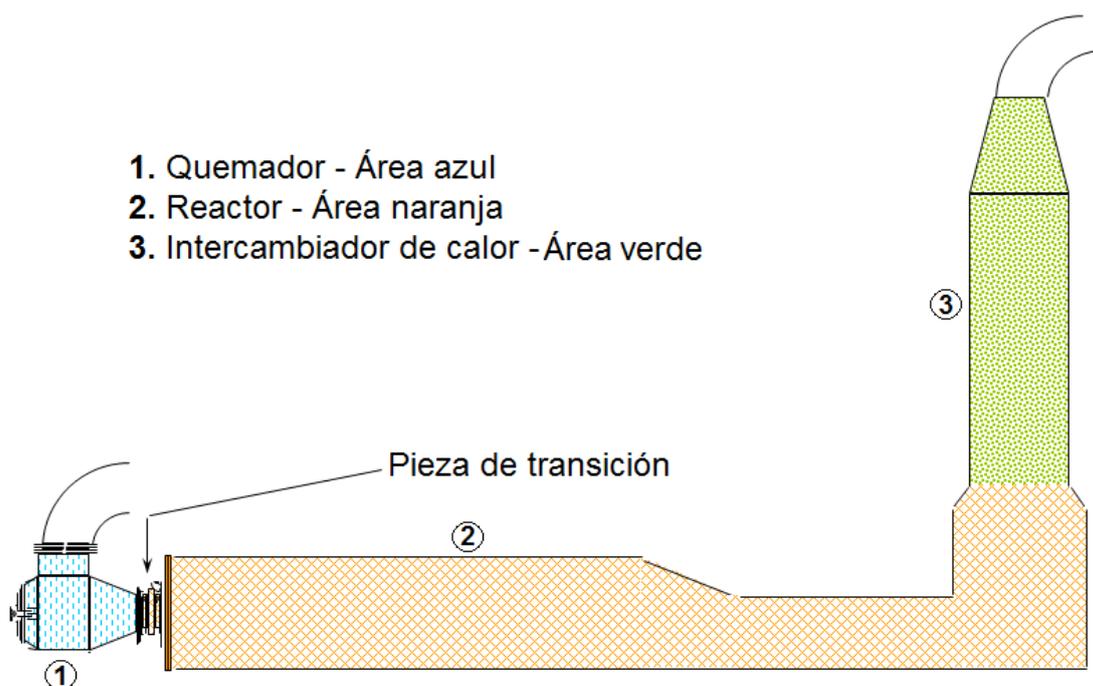
El negro de humo contiene de 88 a 99.3% de carbono, 0.4-0.8% de hidrógeno, y 0.3 a 17% de oxígeno. El hidrógeno es un remanente de las moléculas de hidrocarburo originales, y por eso forma parte de la estructura gráfica. Por otro lado, como el oxígeno se absorbe en la superficie, se le puede incorporar en cantidades variables mediante tratamientos posteriores<sup>17</sup>.

Las variedades de negro de humo comercial tienen una amplia gama de propiedades físicas y químicas, similares a las del grafito; pero como contiene grupos superficiales, las características de los productos finales en donde se usan son diferentes. El negro de humo se usa en el hule de las llantas, en la fabricación de tintas, lacas, pinturas, en cierto tipo de polietileno. También se emplea el negro de humo para la fabricación de diamantes artificiales y para sembrar las nubes a fin de provocar lluvia.

El negro de humo se obtiene mediante la combustión incompleta de un hidrocarburo tal como petróleo, gas natural y otros materiales bien conocidos, a elevadas temperaturas. Cuando se separa de los gases de reacción, el producto es un polvo esponjoso de negro de humo.

### 1.2.3. Definición del proceso y sus etapas por cabot corporation

El proceso por etapas está constituido por una zona de combustión primaria (primera etapa) en donde se forma una corriente de productos de combustión gaseosa calientes; una segunda zona o zona de transición en donde se inyecta una alimentación hidrocarbonada líquida, bien en forma pre-atomizada o bien en forma de corrientes coherentes no pre-atomizadas, de un modo sustancialmente radial desde la periferia exterior o interior de la corriente gaseosa de combustión dentro de la corriente preformada de gases de combustión calientes; y una tercera zona (la zona de reacción) en donde se verifica la formación del negro de humo antes del término de la reacción por enfriamiento.



**Figura 2.** Etapas o zonas del proceso.<sup>3</sup>

Intercambiador de calor (utilizado para precalentar el aire de combustión), el quemador (utilizado para combinar primera etapa de combustible y aire de combustión para formar gases a alta temperatura), y el reactor (utilizado para romper la materia prima para formar negros de carbono).

<sup>3</sup> Registros de Cabot Colombia S.A.

#### 1.2.4. Componentes de las etapas del proceso

**Quemador** – El aire de combustión precalentado y el combustible secundario se combinan para crear un gas a alta temperatura que se utiliza para atomizar el material de alimentación (combustible primario) inyectado en la zona de transición. El enriquecimiento de la mezcla con oxígeno se utiliza a veces para aumentar el rendimiento. Típicamente, se añade oxígeno al aire de combustión, pero los ensayos están en marcha para evaluar la inyección a través de la transición.

El quemador se utiliza para calentar el reactor a la temperatura de funcionamiento y para proporcionar continuamente el calor para la reacción que convierte el aceite reactor de negro de carbón. Se quema el gas natural o aceite, en los depósitos del quemador y se utiliza aire de combustión caliente para establecer la relación de combustión en el quemador. Esta relación de combustión se conoce como la combustión primaria (PC).

$$PC = \text{AIRE} / (\text{ATB} * \text{quemador de combustible}) * 100\%$$

El quemador consta de un revestimiento refractario cilíndrico y una caja de viento (Windbox) en el extremo delantero; en los cuales está montado el conjunto de boquillas de la llama y en la parte final de los cuales se monta la pieza de transición, donde comienza el reactor.

El aire de combustión para el quemador se proporciona a través de la voluta de la caja de viento.

Las boquillas de la llama, están diseñadas para proporcionar una llama estable.

La caja de aire del quemador, es la carcasa dentro del cual se encuentra todo lo necesario para el quemador. Es la conexión para el aire de combustión y su diseño permite dirigir el flujo adecuado a la sección de estabilizador de llama. También está diseñado para dirigir el aire alrededor de la camisa del quemador para fines de refrigeración. Sin esta función, el funcionamiento interno de los quemadores no sobrevivirían mucho tiempo en su entorno sobrecalentado.

El revestimiento de carburo de silicio sirve como un aislante entre los gases de combustión y el revestimiento de metal.

El oxígeno puede añadirse al aire de combustión aguas abajo del intercambiador de calor y aguas arriba del quemador, para aumentar la tasa de producción de negro de carbono.

**Transición** - Conecta el quemador al reactor y contiene el anillo de aceite, el cual contiene los orificios de inyección del combustible de alimentación (arotar). En la transición, el área de la sección transversal del aire de combustión que se calienta es mínima y por lo tanto la velocidad es máxima. Esto proporciona el calor de flujo cruzado, de alta velocidad necesaria para atomizar y reaccionar con los chorros de materia prima primaria inyectados a través tanto de la transición (anillo) como los inyectores. Algunas transiciones están equipadas para permitir la inyección de aire "secundaria" axialmente en el reactor, por lo general para aumentar el rendimiento en los mismos niveles de limpieza.

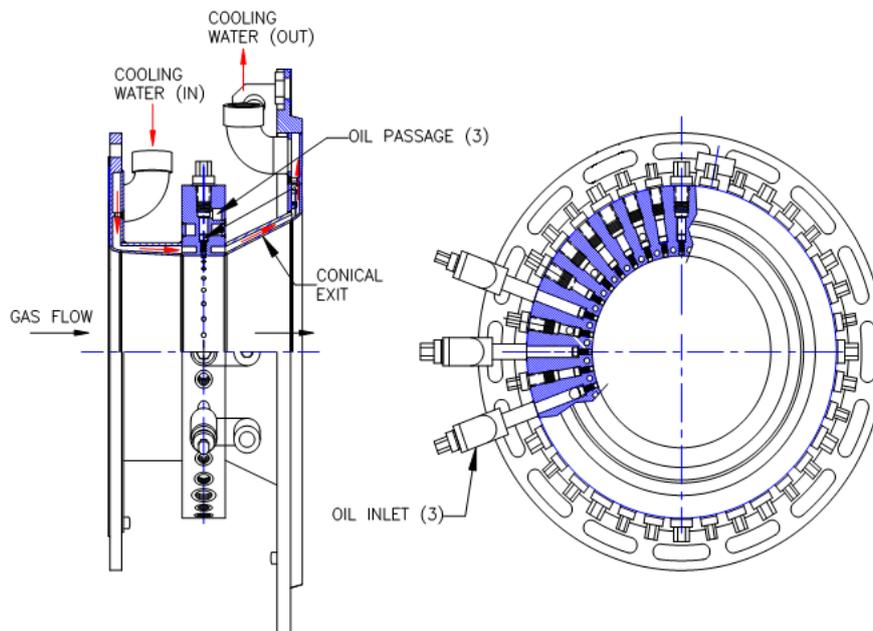


Figura 3. Esquema de la pieza de transición.<sup>4</sup>

**Reactor** - En el reactor, un túnel largo y aislado, el material de alimentación atomizado reacciona con el aire de combustión caliente para formar negro de humo. La reacción es controlada por "enfriamiento" del flujo, con agua a uno o más puntos aguas abajo.

El reactor consiste en la cámara de transición, inyector, cámara del reactor y la cámara de evaporación. La transición es un conjunto de anillos en cada uno de los cuales está montado un número fijo de orificios de inyección simétricamente espaciados. Se inyecta aceite radialmente hacia el interior en la zona de

<sup>4</sup> Registros de Cabot Colombia S.A.

transición. Los inyectores atomizan el aceite para proporcionar una buena cobertura y penetración. El inyector es una sonda de agua enfriada insertado axialmente a través del quemador hasta el centro de la pieza de transición. El inyector inyecta aceite del centro radialmente hacia fuera. Se utiliza para mejorar la eficiencia de la inyección de aceite más allá del nivel alcanzable con sólo una transición. La cantidad de aceite se controla por la combustión total (OAC) que es la relación entre aire y combustible al reactor.

$$\text{OAC} = \frac{\text{Aire total}}{(\text{ATB} * (\text{quemador de combustible} + \text{ATBO}) * \text{Aceite})} * 100\%$$

La cámara de reactor proporciona el tiempo de reacción para la reacción del producto. El enfriamiento con agua se utiliza para detener la reacción en un punto en el proceso que produce el negro de carbono especificado y para controlar la temperatura de entrada del intercambiador de calor. La cámara de evaporación proporciona el tiempo de residencia para la evaporación del agua de enfriamiento, manteniendo la corriente de gas de alimentación en el intercambiador de calor seco. Ambos proporcionan contención para la temperatura del proceso dentro del revestimiento refractario. No hay ninguna separación física entre la cámara del reactor y la evaporación, pero son más bien dos etapas del proceso, antes y después de la pulverización de enfriamiento rápido. La cámara de evaporación también incluye la sección antes del intercambiador de calor. Hay numerosos puertos de enfriamiento localizados a lo largo del lado de la cámara del reactor para toda la longitud de esta.

Por lo general se añade carbonato de potasio o acetato de potasio en la transición, para controlar la estructura del negro de carbono.

**Intercambiador de calor** - también conocido como el precalentador de aire de combustión, el intercambiador de calor calienta el aire de combustión que se encuentra a temperatura atmosférica mediante la extracción de calor desde el flujo de negro de humo y los gases que salen del reactor. Todos los intercambiadores de calor Cabot son de un diseño de carcasa y tubo.

### 1.3 PARÁMETROS Y LINEAMIENTOS DEL PROCESO

La presión relativa, o presión por encima de la ambiental, dentro de la zona de combustión es de por lo menos 51 mm de mercurio. Con preferencia, la presión

relativa dentro de la zona de combustión debería ser de al menos 152 mm de mercurio y aún más preferiblemente por encima de 254 mm de mercurio.

La alimentación se inyecta entonces en la corriente gaseosa de combustión caliente de un modo sustancialmente radial o axial. Preferiblemente, la alimentación se inyecta en la corriente gaseosa de combustión en forma de corrientes coherentes no pre-atomizadas radialmente hacia el interior o hacia el exterior desde la periferia interior y/o exterior de la corriente gaseosa de combustión. Asimismo, es posible, cuando la alimentación se inyecta tanto desde la periferia exterior como desde la periferia interior de la corriente gaseosa de combustión, inyectar dicha alimentación en forma pre-atomizada desde una de las periferias y en forma no pre-atomizada desde la otra periferia.

Después de la inyección de la alimentación en la corriente gaseosa de combustión, la cual contiene a la alimentación, fluye a través de la zona de transición al interior de una primera zona de reacción que tiene un área en sección transversal interna mayor que la mostrada por la zona de transición. Con preferencia, la relación del área en sección transversal interna de la primera zona de reacción a la de la zona de transición está comprendida entre 1,1 y 4. Desde la primera zona de reacción, la corriente gaseosa de combustión fluye al interior de una zona de la garganta que tiene un área en sección transversal interna más pequeña que la de la zona de transición. Con preferencia, la relación del área en sección transversal interna de la zona de garganta a la de la zona de transición está comprendida entre 0,25 y 0,9 aproximadamente.

Desde la zona de garganta, a corriente gaseosa de combustión, que contiene a la alimentación, fluye al interior de una segunda zona de reacción que tiene un área en sección transversal interna mayor que la de la zona de garganta. Preferiblemente, la relación del área en sección transversal interna de la segunda zona de reacción a la de la zona de transición está comprendida entre 1,1 y 16 aproximadamente. A continuación, y dentro de la segunda zona de reacción, se termina el proceso de formación de negro de humo mediante la inyección de un medio de enfriamiento, tal como agua.

El equipo quemador del reactor en Cabot está diseñado para funcionar a 1800 °C (3300 °F) durante 2 a 3 años. Un sistema de bucle cerrado se utiliza para hacer circular agua de refrigeración; refrigerar la placa frontal del reactor con agua es la mejor práctica recomendada para su uso en plantas de Cabot hoy. El sistema de refrigeración de agua utiliza el agua de salida de la transición de aceite para enfriar la placa frontal del reactor. Esto ofrece un mejor entorno

para el operador mediante la reducción de la temperatura del metal expuesto en la cara reactor por debajo de 93 °C. Esto se realiza mediante la instalación de la placa frontal en serie con la salida de transición. El aumento de temperatura es típicamente entre 5 y 7 °C por encima de la temperatura normal de salida de transición, sin caídas de presión significativas. El agua de enfriamiento vuelve a intercambiadores de calor que eliminan el calor capturado. Todas las camisas refrigeradas por agua requieren un flujo de velocidad mínimo de 1 pie/s (18,3 metros/minuto), para una refrigeración adecuada dentro del sistema de deflexión de refrigeración. El efecto de enfriamiento aplicado correctamente debe garantizar que las temperaturas de salida de las transiciones y camisas de los inyectores se mantengan por debajo 93 °C (199 °F) y por encima de la congelación en todo momento.

Las transiciones pueden variar de tamaño de 4,5" a 17". Cada tamaño de transición tiene un requisito de flujo mínimo, basado en la caída de presión, la superficie y el requisito de flujo de 1 pie/seg. **Ver Tabla 2** a continuación para caudales mínimos. Las transiciones utilizan una conexión NPT 2 pulgadas tanto para entrada y salida.

| Equipo                         | Flujo, kg/hr (gpm) | Flujo de alarma, kg/hr | Flujo mínimo, kg/hr |
|--------------------------------|--------------------|------------------------|---------------------|
| Transición - 4.5"              | 13500 (60)         | 10800                  | 9450                |
| Transición - 10.4" a 12.4"     | 18000 (80)         | 16000                  | 14000               |
| Transición - 13.6" a 14.7"     | 22500 (100)        | 20000                  | 18000               |
| Transición - 15.6" a 17.0"     | 29250 (130)        | 23400                  | 20475               |
| Inyección                      | 6750 (30)          | 5400                   | 4725                |
| Transición - 12.4" + inyección | 24750 (110)        | 21400                  | 18725               |

Tabla 2. Valores de flujo con relación a tamaño de transiciones.<sup>5</sup>

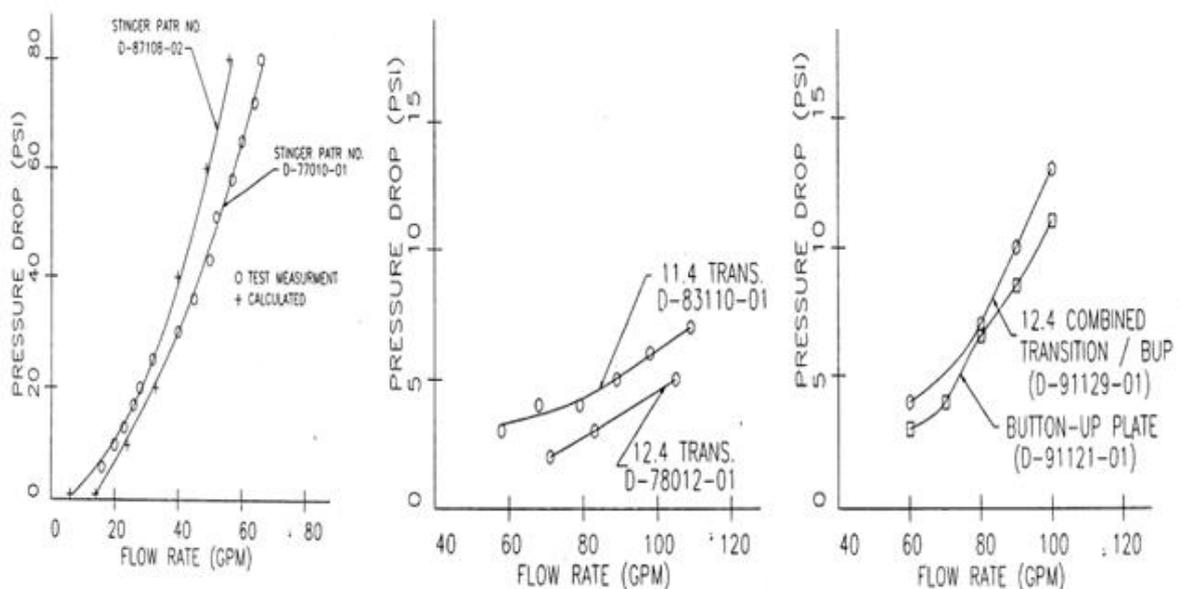
Varias partes críticas de la unidad del quemador son refrigeradas por agua, porque están expuestas a temperaturas superiores a los puntos de fusión de la mayoría de los materiales refractarios comunes; por lo tanto, el flujo no debe ser interrumpido por ningún motivo.

<sup>5</sup> Tabla tomada de la información suministrada por CABOT COLOMBIANA S.A.

Existen dos restricciones para el flujo de agua de refrigeración:

- **El aumento de temperatura** - el agua debe ser capaz de enfriar las piezas sin alcanzar su punto de ebullición.
- **La velocidad del flujo** - no debe existir ningún área estancada (0,3 a 1 m/s son las velocidades recomendadas para evitar la ebullición local).

En la **gráfica 1** se muestran valores que representan los datos para equipos nuevos o limpios; como equipos antiguos, en los cuales las caídas de presión aumentan, pero el mantenimiento de la calidad del agua de refrigeración y la realización de prácticas de descascarillado de rutina, para eliminar los residuos, reducirá al mínimo estos efectos.



**Gráfica 1.** Caída de presión vs. Velocidad de flujo para diversos Componentes del quemador refrigerados por agua.<sup>6</sup>

#### 1.4. MATERIAL DE FABRICACIÓN DE LAS PARTES DEL REACTOR

Debido al entorno de trabajo de estos equipos, en el cual las altas temperaturas, agentes químicos y corrosivos figuran, es necesaria la implementación de aceros inoxidable austeníticos para la fabricación de estos;

<sup>6</sup> Gráfica tomada de la información suministrada por CABOT COLOMBIANA S.A.

quienes garantizan un tiempo de vida mayor y alta resistencia a los ataques provocados por los agentes corrosivos.

#### 1.4.1. Aceros inoxidables y su clasificación

Los aceros inoxidables se seleccionan debido a su excelente resistencia a la corrosión. Todos los aceros inoxidables verdaderos contienen un mínimo de 12 % de Cr, lo que permite que se forme una delgada capa de óxido de cromo al exponer el acero al oxígeno.

**Aceros inoxidables ferríticos** Los aceros inoxidables ferríticos contienen hasta 30 % de Cr y menos de 0,12 % de C. Debido a su estructura CC (cúbica centrada), los aceros inoxidables ferríticos tienen buena resistencia mecánica y una ductilidad moderada, derivadas del endurecimiento por solución sólida y endurecimiento por deformación. Además tienen una excelente resistencia a la corrosión, una conformabilidad moderada y son relativamente económicos.

**Aceros inoxidables martensíticos** Los aceros inoxidables martensíticos también se basan en la adición de cromo como el principal elemento de aleación, pero con un alto contenido de carbono y cromo generalmente más bajos (por ejemplo, 12% en los grados 410 y 416) que los tipos ferríticos; El grado 431 tiene un contenido de cromo de aproximadamente 16%, pero el microestructura sigue martensita a pesar de este alto nivel de cromo debido a que este grado también contiene 2% níquel.

**Aceros inoxidables austeníticos** Los aceros inoxidables austeníticos contienen al menos 16% de cromo y 6% de níquel; el níquel funciona como un elemento estabilizador de la austenita. Estos aceros CCC (cúbicos centrados en las caras) tienen excelente ductilidad, conformabilidad y resistencia mecánica a la corrosión.

**Aceros inoxidables endurecidos por precipitación (PH)** Los aceros inoxidables endurecidos por precipitación (PH) contienen Al, Nb o Ta y deben sus propiedades a los endurecimientos por solución sólida, por deformación, por envejecimiento y por la transformación martensítica. El acero es calentado primero y después templado para inducir que la

austenita se transforme en martensita. El recalentamiento permite tener precipitados como el NiAl a partir de la martensita. Se obtienen altas propiedades mecánicas, incluso con bajos contenidos de carbono.

**Aceros inoxidables dúplex** En algunos casos, en la estructura de los aceros inoxidables se introducen de manera deliberada mezclas de fases. Mediante un control apropiado de la composición y del tratamiento térmico, se puede producir un acero inoxidable dúplex, que contenga 50 por ciento de ferrita y de austenita. Esta combinación proporciona un conjunto de propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión, conformabilidad y soldabilidad, que no se obtiene en ningún otro de los aceros inoxidables normales.

#### **1.4.2. Beneficios y propiedades de los aceros inoxidables**

##### **Resistencia a la corrosión**

Menores grados de aleaciones resistentes a la corrosión en ambientes de agua atmosféricos y puros, mientras que los grados de alta aleación pueden resistir la corrosión en la mayoría de los ácidos, soluciones alcalinas, y entornos de cojinete de cloro, propiedades que se utilizan en plantas de proceso.

##### **Resistencia al fuego y el calor**

Cromo alta Especial y grados de níquel aleado resisten a escalar y retener a la fuerza a altas temperaturas.

##### **Higiene**

La capacidad de facilitar la limpieza de acero hace que sea la primera opción para estrictas condiciones de higiene, tales como hospitales, cocinas, mataderos y plantas de procesamiento de alimentos.

##### **La apariencia estética**

La superficie brillante, de fácil mantenimiento en acero inoxidable proporciona un aspecto moderno y atractivo.

##### **Resistencia-peso**

El trabajo de endurecimiento característica de los grados austeníticos, que da como resultado un fortalecimiento significativo del material de los tipos dúplex en frío trabajando solo, y la alta resistencia, permiten la reducción de espesor de material sobre los grados convencionales, por lo tanto, el ahorro de costes.

### **Facilidad de fabricación**

Técnicas de fabricación de acero inoxidable modernos significan que se puede cortar, soldar, formado, mecanizado, y fabricado tan fácilmente como aceros tradicionales.

### **Resistencia al impacto**

La microestructura austenítica de la serie 300 proporciona una alta resistencia, de temperaturas elevadas para el momento por debajo de cero, por lo que estos aceros especialmente adecuado para aplicaciones criogénicas.

### **Valor a largo plazo**

Cuando se consideran los costos totales del ciclo de vida, el acero es a menudo la opción menos costosa material.

Existen varias clases de aceros inoxidables basados en estructuras cristalinas y mecanismos de endurecimiento. Las propiedades típicas se encuentran en **la tabla 3**.

| Acero                             | % C  | % Cr | % Ni | Otros   | Resistencia mecánica la tensión (psi) | Esfuerzo de cedencia (psi) | % elongación | Estado                        |
|-----------------------------------|------|------|------|---------|---------------------------------------|----------------------------|--------------|-------------------------------|
| Austenítico:                      |      |      |      |         |                                       |                            |              |                               |
| 201                               | 0.15 | 17   | 5    | 6.5%Mn  | 95,000                                | 45,000                     | 40           | Recocido                      |
| 304                               | 0.08 | 19   | 10   |         | 75,000                                | 30,000                     | 30           | Recocido                      |
|                                   |      |      |      |         | 185,000                               | 140,000                    | 9            | Deformado en frío             |
| 304L                              | 0.03 | 19   | 10   |         | 75,000                                | 30,000                     | 30           | Recocido                      |
| 316                               | 0.08 | 17   | 12   | 2.5% Mo | 75,000                                | 30,000                     | 30           | Recocido                      |
| 321                               | 0.08 | 18   | 10   | 0.4% Ti | 85,000                                | 35,000                     | 55           | Recocido                      |
| 347                               | 0.08 | 18   | 11   | 0.8% Nb | 90,000                                | 35,000                     | 50           | Recocido                      |
| Ferrítico:                        |      |      |      |         |                                       |                            |              |                               |
| 430                               | 0.12 | 17   |      |         | 65,000                                | 30,000                     | 22           | Recocido                      |
| 442                               | 0.12 | 20   |      |         | 75,000                                | 40,000                     | 20           | Recocido                      |
| Martensítico:                     |      |      |      |         |                                       |                            |              |                               |
| 416                               | 0.15 | 13   |      | 0.6% Mo | 180,000                               | 140,000                    | 18           | Templado y revenido           |
| 431                               | 0.20 | 16   | 2    |         | 200,000                               | 150,000                    | 16           | Templado y revenido           |
| 440C                              | 1.10 | 17   |      | 0.7% Mo | 285,000                               | 275,000                    | 2            | Templado y revenido           |
| Endurecimiento por precipitación: |      |      |      |         |                                       |                            |              |                               |
| 17-4                              | 0.07 | 17   | 4    | 0.4% Nb | 190,000                               | 170,000                    | 10           | Endurecido por envejecimiento |
| 17-7                              | 0.09 | 17   | 7    | 1.0% Al | 240,000                               | 230,000                    | 6            | Endurecido por envejecimiento |

**Tabla 3.** Composiciones y propiedades típicas de los aceros inoxidables.<sup>7</sup>

Los aceros inoxidables se emplean en diversas áreas de uso diario en el hogar, en la industria, en los hospitales, en la elaboración de alimentos, en la agricultura, en la industria aeroespacial y en muchas otras áreas. El acero inoxidable no es sólo una aleación sino una serie de diferentes composiciones diseñadas para proporcionar propiedades específicas para diferentes aplicaciones. Hay más de 150 grados de acero inoxidable diferentes, pero alrededor de 15 o menos son los más comúnmente utilizados.

#### 1.4.3. Aceros inoxidables utilizados en la fabricación de las partes del reactor según requerimientos de diseño CABOT CORPORATION INC.

**Acero austenítico AISI 316L** Los aceros inoxidables, en particular el 316L, es ampliamente utilizado en ambientes altamente corrosivos, particularmente en agua salada (cloruro es decir, acuosa) aplicaciones. Es más resistente a la

<sup>7</sup> Ciencia e Ingeniería de los Materiales – Donald Askeland Edición 3

corrosión que el 304L debido al molibdeno añadido (Mo). Sin embargo, esta adición viene con un aumento del costo. La composición nominal de 316L se puede ver en **la tabla 4**. Es un hierro (Fe) -basado, bajo en carbono (C) de acero inoxidable con elementos de aleación para promover la resistencia a la corrosión, estabilizar la fase austenítica, y mantener la fuerza y la ductilidad adecuada. Posibles sitios de iniciación de la grieta en 316L son fases secundarias, inclusiones y áreas localizadas inducidas tensión de ruptura de la película.

| C    | Mn   | Si   | P     | S    | Cr             | Mo           | Ni             | N    | Fe      |
|------|------|------|-------|------|----------------|--------------|----------------|------|---------|
| 0.03 | 2.00 | 0.75 | 0.045 | 0.03 | 16.00<br>18.00 | 2.00<br>3.00 | 10.00<br>14.00 | 0.10 | Balance |

**Tabla 4.** Composición nominal de los aceros inoxidables austeníticos 316 L.<sup>8</sup>

Tanto Mo y Cr se agregan para aumentar la resistencia a la corrosión. El Cr promueve la pasivación de la superficie mediante la formación de la película protectora Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. A medida que aumenta el contenido de Cr, la película se vuelve más estable y disminuye la velocidad de corrosión. No está claro cómo Mo mejora la resistencia a la corrosión en ambientes que contienen cloruro. Sin embargo, se ha propuesto que Mo podía espesar la película pasiva existente, aumentar la afinidad de la superficie con el oxígeno, lo que disminuye que se haga propensa la adsorción del cloruro, o formar una película secundaria más protectora que es un óxido amorfo vítreo estructurado.

#### **1.4.4. Aceros inoxidables utilizados de forma alternativa para la fabricación de reactores**

**Acero austenítico AISI 304 y 304 L** Este acero es la más versátil y uno de los más usados de los aceros inoxidables de la serie 300. Tiene excelentes propiedades para el conformado y el soldado. Se puede usar para aplicaciones de embutición profunda, de rolado y de corte. Tiene buenas características para la soldadura, no requiere recocido tras la soldadura para que se desempeñe bien en una amplia gama de condiciones corrosivas. La resistencia a la corrosión es excelente, excediendo al tipo 302 en una amplia variedad de

<sup>8</sup> Austenitic and ferritic stainless steels” in Uhlig’s Corrosion Handbook, 2nd ed. M. A. Streicher. R. W. Revie, ed., 2000, pp. 601-650.

ambientes corrosivos incluyendo productos de petróleo calientes o con vapores de combustión de gases. Tiene excelente resistencia a la corrosión en servicio intermitente hasta 870 °C y en servicio continuo hasta 925°C. No se recomienda para uso continuo entre 425 - 860°C pero se desempeña muy bien por debajo y por encima de ese rango.

Propiedades mecánicas que destacan de estos aceros son la resistencia a la fluencia 310 MPa (45 KSI), resistencia máxima 620 MPa (90 KSI), elongación 30 % (en 50mm), reducción de área 40 % y módulo de elasticidad 200 GPa (29000 KSI).

Propiedades físicas: Densidad 7.8 g/cm<sup>3</sup> (0.28 lb/in<sup>3</sup>).

| C      | Mn     | Si     | Cr           | Ni           | P       | S      |
|--------|--------|--------|--------------|--------------|---------|--------|
| 0.08 % | 2.00 % | 1.00 % | 18.0 – 20% % | 8.0 – 10.5 % | 0.045 % | 0.03 % |

**Tabla 5.** Composición química del acero inoxidable AISI 304.<sup>9</sup>

Los aceros inoxidables austeníticos AISI 304 y 304 L pueden utilizarse como alternativa de fabricación; sin embargo, aunque las propiedades de este acero comparadas con las del acero inoxidable austenítico AISI 316 L guardan similitud, la vulnerabilidad de los aceros AISI 304 y 304 L se hace mayor al entrar en contacto con el entorno en el que trabaja el reactor, por esta razón CABOT CORPORATION INC. decide fabricar sus piezas con el acero AISI 316 L.

## 1.5. TIPOS DE CORROSIÓN EN ACEROS INOXIDABLES

### 1.5.1. Corrosión general

El ejemplo más común de la corrosión "general" o "uniforme" es el ataque que se produce cuando el acero al carbono sin protección se sumerge en agua o en un ácido suave. Se caracteriza por adelgazamiento uniforme del metal.

La corrosión general de un acero inoxidable se produce cuando hay un amplio desglose de la película pasiva protectora, permitiendo que toda la superficie

<sup>9</sup> Valores tomados de <http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/AISI%20304.pdf>

experimente corrosión activa. Es raro ver a la corrosión general del acero inoxidable.

Debido a la relativamente alta resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables, requieren un entorno muy agresivo tales como ácidos o bases fuertes para producir este modo de ataque. La velocidad de corrosión uniforme por lo general aumenta con temperaturas más altas y aumento de las tasas de flujo.

La causa más común de corrosión general en el acero inoxidable es el uso de una aleación inapropiada con insuficiente resistencia al medio.

### 1.5.2 Corrosión galvánica

Cuando dos metales o aleaciones diferentes se sumergen en una solución corrosiva o conectados regularmente por la humedad, cada uno desarrollan un potencial de corrosión. Si las condiciones para la corrosión galvánica están presentes, el metal más noble se convertirá en el cátodo y el metal más activo se convertirá en el 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. El aumento de la corrosión del ánodo se llama "corrosión galvánica".

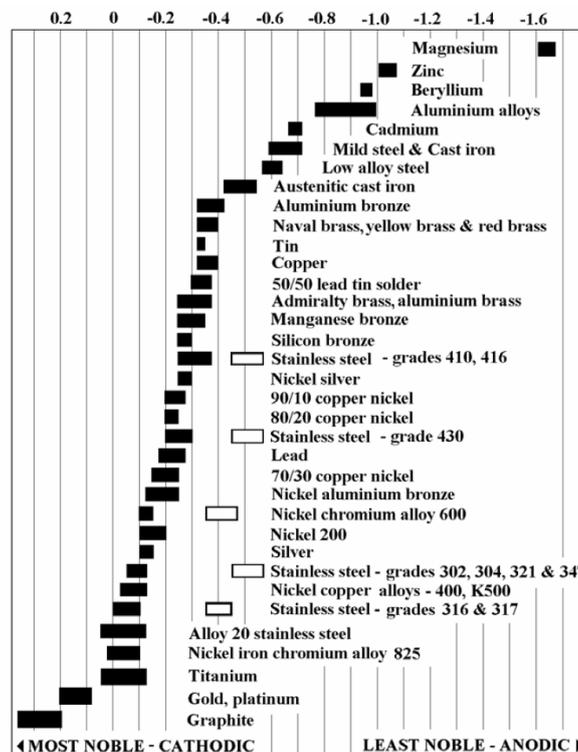
La corrosión galvánica se utiliza a veces para extender la vida útil de los materiales (por ejemplo, recubrimientos de zinc en acero al carbono y ánodos de zinc en los calentadores de agua), pero, si no se considera y existen las condiciones adecuadas, puede dar lugar a fallos inesperados.

Para que la corrosión galvánica que se produzca, se requieren tres elementos:

- Dos metales con diferentes potenciales de corrosión
- Contacto directo entre los metales
- Una solución de electrolito conductor (por ejemplo agua) se debe conectar los dos metales sobre una base regular. La solución de electrolito crea un "camino conductivo".

Cuando dos metales diferentes se acoplan entre sí en la atmósfera o el agua, la probabilidad de desarrollar la corrosión galvánica puede ser predicha utilizando una "serie galvánica".

**La gráfica 2** muestra la serie galvánica medida en agua de mar para algunos metales y aleaciones comunes. Cuando dos metales están más separados en la lista (por ejemplo, una mayor diferencia entre los dos números), se aumenta la fuerza motriz de la corrosión galvánica. Los anódicos metales mayoría (activo) se encuentran en la parte superior y más catódica (noble) en la parte inferior. Tanto barras sólidas y huecas se muestran para los aceros inoxidable. Las barras huecas representan la actividad corrosiva en el acero inoxidable, que tiene un potencial diferente, entonces se pasiva (no se corroe). En la mayoría de aplicaciones, donde se combinan metales diferentes, la barra sólida se debe utilizar para determinar la posición de la de acero inoxidable.



Gráfica 2. Serie galvánica en agua de mar.<sup>10</sup>

### 1.5.3. Corrosión por picaduras e intersticio

La corrosión localizada tales como corrosión por picaduras y grietas de los aceros inoxidable en general se produce en presencia de iones haluro, típicamente de cloruro (por ejemplo, sales de cloruro costeras y de deshielo -

<sup>10</sup> <http://www.ssina.com/corrosion/galvanic.html>

sodio, calcio o magnesio cloruros; ácido clorhídrico; lejía - sodio o hipoclorito de calcio; y otra de cloruro de compuestos).

### **Picaduras**

Las picaduras se producen cuando hay una ruptura localizada de capa pasiva protectora del acero inoxidable sobre una superficie expuesta abiertamente. Una vez iniciada la tasa de crecimiento del pozo puede ser relativamente rápida, que resulta en cavidades profundas e incluso a través de la pared ataque.

### **Intersticios**

Corrosión por intersticios se produce en lugares donde no se puede circular libremente oxígeno tal como articulaciones apretadas, bajo las cabezas de tornillos y en otras circunstancias en las que las piezas de metal están en contacto cercano.

Las sales de cloruro, los contaminantes y la humedad del ambiente se acumulan en la grieta. El ambiente dentro de la grieta se agota de oxígeno, enriquecido en cloruros, y se acidifica promoviendo la descomposición de la película pasiva y la disolución anódica.

### **Factores Ambientales**

Los factores ambientales importantes que favorecen el ataque localizado son lo de más altos contenido de cloruro, las temperaturas más altas, menor pH y potenciales de corrosión más nobles.

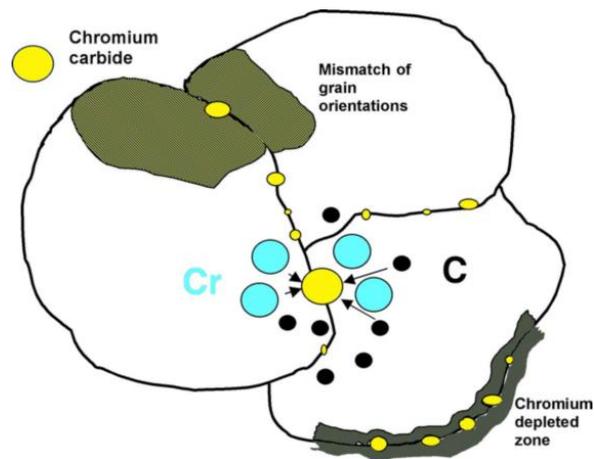
#### **1.5.4. Corrosión Intergranular**

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.

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.

#### **Ataque intergranular de aceros inoxidables austeníticos**

Con los aceros inoxidable austeníticos, el ataque intergranular es generalmente el resultado de la precipitación de carburo de cromo ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) en los límites de grano, lo que produce una zona estrecha del agotamiento de cromo en el límite de grano. Esta condición se denomina sensibilización y se muestra esquemáticamente **la figura 3**.



**Figura 4.** Agotamiento de cromo en los límites de grano, Sensibilización.<sup>11</sup>

### 1.5.5. Corrosión bajo tensión

La combinación de la tensión de tracción y un ambiente corrosivo específico puede agrietar los aceros inoxidable. Este modo de ataque se denomina corrosión bajo tensión (SCC por sus siglas en inglés). La condición de exposición ambiental más común responsable de SCC de los aceros inoxidable es la presencia de cloruros. Aunque no existe un grado de acero inoxidable totalmente inmune a cloruro SCC, la resistencia relativa de los aceros inoxidable varía sustancialmente.

#### Influencia de la composición de la aleación

La resistencia relativa a SCC es dependiente de la familia de acero inoxidable. La familia de los aceros inoxidable austenítico es el más susceptible. La resistencia de los aceros inoxidable austeníticos a SCC está relacionada con el contenido de níquel del acero.

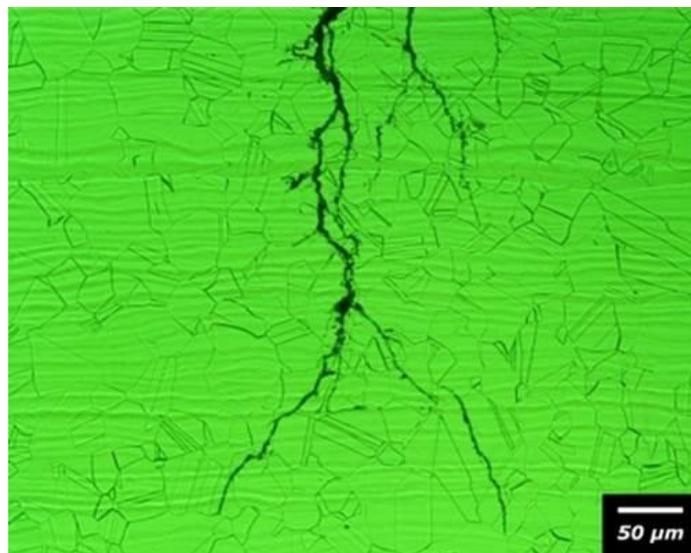
<sup>11</sup> <http://www.ssina.com/corrosion/igc.html>

Los grados austeníticos más susceptibles tienen contenidos de níquel en el intervalo de 8 a 10% en peso. Por lo tanto, los grados estándar tales como 304 / 304L y 316 / 316L son muy susceptibles a este modo de ataque. Los grados austeníticos con contenidos relativamente altos de níquel y molibdeno, tales como aleación de 20, 904L, y el 6% de molibdeno, grados súper austeníticos tienen sustancialmente mejor resistencia a SCC cloruro.

La familia de los aceros inoxidable ferríticos, que incluye los grados tales como el tipo 430 y 444 son muy resistentes a cloruro SCC. El acero inoxidable dúplex con sus austenita / ferrita microestructuras duales tiene una resistencia que está entre los grados de la austenita y ferrita.

### Apariencia del agrietamiento

La morfología típica del agrietamiento por corrosión bajo tensión se compone de grietas transgranulares ramificadas. **La Figura 4** muestra el agrietamiento que se produjo en un acero inoxidable súper austenítico, 6 % Mo expuesto al 0,2 % cloruros a 500 ° F (260 ° C).



**Figura 5.** Aspecto típico de la presencia de SCC.<sup>12</sup>

### Factores Ambientales

Los factores ambientales que aumentan la susceptibilidad de craqueo incluyen temperaturas más altas, mayor contenido de cloruro, un pH más bajo, y

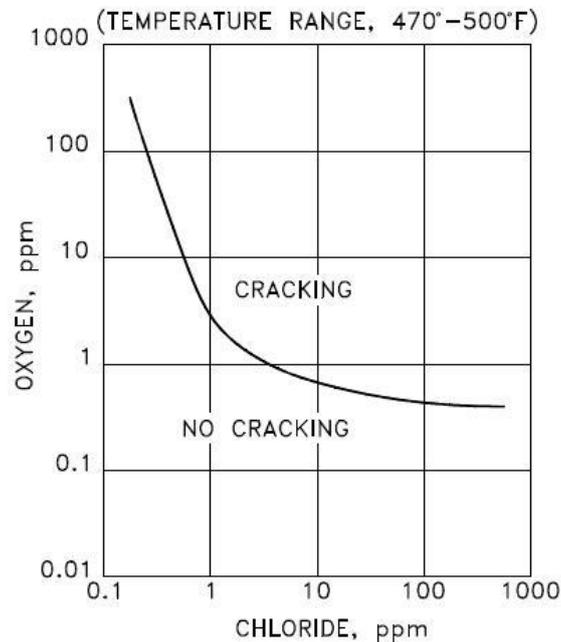
<sup>12</sup> <http://www.ssina.com/corrosion/stress-corrosion-cracking.html>

mayores niveles de esfuerzo de tracción. La temperatura es una variable importante. Cuando los aceros inoxidable están completamente inmersos, es raro ver a la corrosión bajo tensión a temperaturas inferiores a 60 °C (150 °F).

Hay una relación sinérgica entre el oxígeno disuelto y el nivel de cloruro. Si el nivel de oxígeno se reduce a la gama de 0,01 a 0,1 ppm, en soluciones acuosas que contienen niveles bajos de cloruro no son propensas a agrietarse las aleaciones austeníticas, tales como 304L y 316L.

En entornos de servicios reales, la evaporación puede producir acumulación local de sustancias corrosivas agresivas, tales como cloruros y los iones H<sup>+</sup>, lo que resulta en condiciones que son sustancialmente más agresivas. En condiciones de evaporación severas, los aceros inoxidable pueden agrietarse a temperaturas muy por debajo de los umbrales medidos en condiciones donde hay una inmersión total.

**La gráfica 3** muestra el umbral de craqueo para el acero inoxidable 304L y 316L como una función de temperatura y contenido de cloruro. El nivel de cloruros requerido para producir el agrietamiento es relativamente bajo. Los fracasos se han reportado en ambientes con un mínimo de 10 ppm de cloruros. Esto es particularmente cierto para los entornos que tienen mecanismos de concentración (evaporación), tales como interfaces de húmedo / seco o una película de la solución en contacto inmediato con una superficie que rechaza calor. En estas situaciones, unas pocas ppm de cloruros en la solución a granel se pueden concentrar a cientos de ppm en la zona de evaporación.



**Gráfica 3.** Umbral de agrietamiento de aleaciones 304 y 316 expuestas cerca de aguas con contenido de cloruro.<sup>13</sup>

## 1.6. SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS INOXIDABLES

La soldabilidad de los diversos grados de aceros inoxidable varía considerablemente. Casi todos pueden soldarse, y los grados austeníticos son algunos de los más fáciles de soldar. En general, los aceros inoxidable tienen soldabilidad que dependen de la familia a la que pertenecen. Algunas recomendaciones para la soldadura de los grados comunes se muestran en la tabla 6.

### Soldadura En Aceros Inoxidables Austeníticos

Los grados austeníticos pueden soldarse muy fácilmente. Todos los procesos de soldadura eléctricos habituales se pueden usar - Manual de arco metálico (MMAW o "stick"), Gas arco de tungsteno (GTAW o TIG), arco metálico con gas (GMAW o MIG), núcleo de fundente (FCAW) y arco sumergido (SAW). Una gama completa de consumibles de soldadura y equipamiento de serie son fáciles de conseguir y utilizar.

La soldadura TIG, proporciona uniones limpias y de gran calidad, tiene bajo riesgo de inclusiones de escoria y en muchas ocasiones simplifica la limpieza

<sup>13</sup> [http://www.corrosionist.com/what\\_is\\_chloride\\_stress\\_corrosion\\_cracking.htm](http://www.corrosionist.com/what_is_chloride_stress_corrosion_cracking.htm)

final. El proceso puede usarse para soldar casi todo tipo de metales, adelantarse de forma manual, semiautomática o automatizada.

El proceso de soldadura GTAW –por sus siglas en inglés Gas Tungsten Arc Welding– también conocido como TIG (Tungsten Inert Gas), está entre las técnicas de soldadura más difíciles de aprender y tiene diferentes ventajas y desventajas. La TIG es adecuada para ciertas aplicaciones y totalmente inapropiada para otras. La GTAW usa un electrodo no consumible de Tungsteno para crear un arco y transferir calor al metal base que se está soldando. Al mismo tiempo, un gas inerte<sup>14</sup>, generalmente Argón o una mezcla de Argón/Helio, protege el charco de soldadura de la atmósfera y contra la contaminación.

### **Soldadura Aceros Inoxidables Dúplex**

Los aceros inoxidables dúplex tienen también una buena soldabilidad, aunque no tan buena como la de los austeníticos. Una vez más todos los procesos habituales se pueden utilizar, y una gama de consumibles está disponible. Para el más común duplex grado 2205 el consumible estándar es de un 2,209 - el contenido de níquel superior asegura que la estructura de austenita se mantenga 50/50 con respecto a la ferrita en el depósito de soldadura, manteniendo así la fuerza, ductilidad y resistencia a la corrosión. Una de las ventajas de los aceros inoxidables dúplex frente a los austeníticos es su bajo coeficiente de expansión térmica.

### **Soldadura en Aceros Inoxidables Martensíticos**

Los aceros inoxidables martensíticos se pueden soldar, pero la precaución debe ser ejercida, ya que se puede generar una zona muy dura y quebradiza adyacente a la soldadura. El agrietamiento en esta zona puede ocurrir, a menos que se tenga cuidado con el precalentamiento y tratamiento térmico después del proceso de soldadura. Estos aceros se sueldan a menudo con las barras de relleno austeníticos para aumentar la ductilidad del depósito.

### **Soldadura en Aceros Inoxidables Ferríticos**

Los ferríticos nuevos no poseen buenas propiedades de soldadura. Los tres problemas importantes son el crecimiento excesivo del grano, la sensibilización y la falta de ductilidad.

---

<sup>14</sup> Inerte significa que el gas no puede combinarse químicamente con otros elementos para formar compuestos.

Algunos de estos problemas se pueden minimizar mediante un tratamiento térmico posterior a la soldadura. El metal de aporte puede ser de cualquiera de una composición similar o, alternativamente, un grado austenítico (por ejemplo, los grados 308L, 309, 316L o 310), que es útil en la mejora de la tenacidad de la soldadura. El excesivo crecimiento del grano es difícil de superar, por lo que la mayoría de los grados solamente se sueldan en calibres delgados. Los ferríticos estabilizados incluyen 409 y 430Ti. Estos poseen considerablemente mejor soldabilidad en comparación con las alternativas no estabilizados como 430. Estos grados se pueden soldar, pero ciertamente no tan fácilmente como los grados austeníticos.

| Grade  | Pre-heat | Post Weld Heat Treatment  | Filler    |
|--------|----------|---|-----------|
| 304    | (a)      | Cool rapidly from 1010-1090°C only if corrosion conditions severe.            | 308L      |
| 304L   | (a)      | Not required  | 308L      |
| 309    | (a)      | Usually unnecessary as this grade is generally used at high temperatures (b). | 309       |
| 310    | (a)      | As for 309  | 310       |
| 316    | (a)      | Cool rapidly from 1060-1150°C if corrosion conditions severe.                 | 316L      |
| 316L   | (a)      | Not required  | 316L      |
| 321    | (a)      | Not required  | 347       |
| 347    | (a)      | Not required  | 347       |
| 530815 | (a)      | Not required  | 530815(h) |
| 410    | (c)      | Air cool from 650-760°C   | 410 (d)   |
| 430    | (c)      | Air cool from 650-760°C   | 430 (d)   |
| 434    | (c)      | Air cool from 760-790°C   | 430 (d)   |
| 3CR12  | (g)      | Not required  | 309 (e)   |
| 2205   | (f)      | Not generally required  | 2209      |

**Tabla 6.** Recomendaciones para la soldadura de aceros inoxidables.<sup>15</sup>

#### Notas:

- a. Innecesario cuando el acero está por encima de 15 ° C.
- b. Cuando la corrosión es un factor, 309S y 310S (0,08% como máximo de carbono) se utilizan, con un tratamiento térmico posterior a la soldadura de enfriamiento rápido desde 1120 hasta 1180 °C.

<sup>15</sup> <http://www.atlassteels.com.au/site/pages/technical-handbooks-of-stainless-steel.php>

- c. Realizar precalentamiento entre 200-320 °C; la hoja de calibre delgado se suelda con frecuencia sin precalentamiento.
- d. Puede ser soldado con electrodos 308L, 309 o 310 sin precalentamiento si el acero está por encima de 15 °C.
- e. Puede ser soldado con 309, 309L, 309Mo, 309MoL, 316L o 308L.
- f. Si la temperatura está por debajo de 10 °C a continuación, se recomienda una precalentamiento de calor a 50 °C.
- g. Consulte el Manual de Columbus 3CR12 Técnica para más detalles y recomendaciones. En el caso de la soldadura estructural crítico de 3CR12 destinado a ambientes corrosivos, consulte Atlas Especialidad Departamento Técnico Metales.
- h. Los consumibles 309 pueden utilizarse si una fuerza y resistencia a la oxidación reducida se puede tolerar.

### 1.6.1. Principales problemas relacionados con la soldadura de los aceros inoxidables

**Penetración Excesiva:** Se caracteriza por exceso material de soldadura respecto a la cantidad requerida para rellenar la junta, este problema puede ser causado por el uso de una regulación de corriente muy alta. La soldadura se vuelve ancha y plana con pequeñas socavaduras a lo largo del contorno del cordón de soldadura. También, la penetración excesiva puede ser el resultado de un avance demasiado lento, en ambas situaciones, se consume mucho más metal de aportación de lo que se requeriría normalmente.

**Penetración insuficiente:** Se produce cuando la corriente de soldadura está regulada demasiado baja. El cordón de soldadura es angosto y convexo, con muy poco o ningún refuerzo de raíz. El avance demasiado rápido también puede producir penetración insuficiente. En ambos casos puede ocurrir la fusión incompleta a lo largo del contorno de la soldadura.

**Porosidad:** Las bolsas de gas que se quedan retenidas en la soldadura o abiertas a la superficie se llaman porosidad. Es un problema que generalmente ocurre debido a la protección inapropiada del baño de soldadura, causado por un bajo caudal de gas protector o el uso de gas protector contaminado o

incorrecto. En otros casos, este defecto puede deberse al amperaje y velocidad de avance excesivo o metales base contaminados.

**Inclusiones de tungsteno:** A veces, las partículas de tungsteno quedan retenidas en el depósito de soldadura, éstas se producen al tocar el electrodo contra el depósito de soldadura o varilla de metal de aporte. Por esta razón es necesario limpiar muy bien esta parte y volver a darle forma si se contamina. Las inclusiones también pueden resultar del amperaje excesivo o del ajuste de alta frecuencia y son las causantes de fisuras y agrietamientos.

**Desgaste prematuro del electrodo:** Es prioritario tener cuidado con el deterioro del electrodo que además de ser costoso, afecta la calidad del cordón. Aunque parezca que no se produce ninguna combinación electroquímica entre electrodo y baño, se pueden producir inclusiones de tungsteno en el baño, lo que es causa de múltiples problemas. Por supuesto, debe tenerse en cuenta que el electrodo nunca debe tocar el baño, especialmente en materiales que se combinan fácilmente con el tungsteno, como todos los metales ligeros. El cobre y el acero son, en este sentido, menos sensibles, y pueden cebar el arco tocando el electrodo con la pieza, siempre y cuando no se toque directamente el baño.

**Ángulos inapropiados del soplete:** Estos dan como resultado defectos, tales como perfil de la soldadura incorrecto, traslapo<sup>16</sup> y socavadura. El ángulo de trabajo inapropiado produce soldaduras de filete de catetos dispares, si el arco se dirige demasiado hacia una de las planchas que forman la pieza de trabajo. El ángulo de avance inapropiado de la pistola puede producir una combinación de defectos de soldadura. La situación más común es dirigir demasiado calor a la varilla de metal de aportación, esto dificulta el trabajo pues el metal de aporte tiende a fundirse causando adiciones inconvenientes de metal de aportación.

**Grietas en el cráter<sup>17</sup>:** Comúnmente, son causadas por una depresión en el extremo de un cordón de soldadura con tendencia a agrietarse. Este problema puede resolverse al depositar metal de aportación adicional en el extremo de cordón de soldadura para rellenar la depresión causada por el proceso.

---

<sup>16</sup> Protrusión de metal de soldadura más allá del borde o raíz de la soldadura.

<sup>17</sup> En soldadura por arco, una depresión en la terminación de un cordón, o en el baño de soldadura debajo del electrodo.

## **1.7. INSPECCIÓN Y ENSAYOS**

### **1.7.1. Ensayos no destructivos**

Los Ensayos no destructivos son un tipo de prueba practicada a un material que no altera de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. Los Ensayos No destructivos implican un daño imperceptible o nulo. Los diferentes métodos de ensayos no destructivos se basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como ondas electromagnéticas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad, absorción y cualquier tipo de prueba que no implique un daño a la muestra examinada. Dentro de los ensayos no destructivos podemos mencionar: radiografía, ultrasonido, inspección visual y tintas penetrantes.

#### **Inspección visual**

La inspección visual es la técnica más antigua entre los Ensayos No Destructivos, y también la más usada por su versatilidad y su bajo costo.

En ella se emplea como instrumento principal, el ojo humano, el cual es complementado frecuentemente con instrumentos de magnificación, iluminación y medición.

Esta técnica es, y ha sido siempre un complemento para todos los demás Ensayos No Destructivos, ya que menudo la evaluación final se hace por medio de una inspección visual.

#### **Inspección por ultrasonido**

En la actualidad existen diversas metodologías de inspección ultrasónica que han evolucionado a la par con el avance en la electrónica.

La normatividad vigente para el diseño, construcción e inspección de recipientes a presión, tuberías de proceso, ductos y tanques de almacenamiento no ha sido la excepción, actualmente la normatividad internacional ha evolucionado para incorporar estas tecnologías de inspección de última generación, las cuales emplean tratamiento computarizado de imágenes para obtener altas probabilidades de detección, registros permanentes y auditables.

Por otra parte, en todo el mundo, estas tecnologías de Ultrasonido están reemplazando a las radiaciones ionizantes (ensayo RX y Gammagrafía) al no

generar ningún tipo de riesgo para las personas y no contaminar el planeta. Los gerentes de proyectos y constructores han aprendido que el verdadero ahorro se encuentra en no parar el avance de la obra para la toma de placas y en reducir las ratas de rechazo al obtener resultados más precisos y oportunos, que permiten establecer controles al proceso.

Este método de ensayo volumétrico permite encontrar discontinuidades internas de los materiales.

En los equipos convencionales de Ultrasonidos se produce impulso rectangular corto que excita un cristal en un palpador. El impulso se genera con una tensión eléctrica de alto voltaje. Las vibraciones producidas en el cristal pasan de ser eléctricas a ser mecánicas, ya que hay un movimiento en la pieza. La oscilación del cristal es de una frecuencia muy alta (Megahercios) y no es audible por el oído humano. La oscilación producida por el cristal se propaga en el material en forma de ondas sonoras. Las ondas sonoras son reflejadas en una superficie límite y captadas por el palpador. Las ondas captadas, o mejor dicho, el sonido captado por el palpador se ve reflejado en la pantalla del equipo (eco). Si se ajusta bien el eco y la pantalla podemos detectar defectos en una pieza, determinar el espesor o determinar la ubicación de reflectores.

## **Metodologías de inspección requeridas por los equipos de UT**

### **Phased array - raster examination (SAUT)**

#### **Ultrasonido *phased array*, configuración lineal**

La técnica de ultrasonido *Phased Array* con configuración **lineal**, simula el ultrasonido manual, solo se reemplaza el movimiento manual por un barrido electrónico (*Electronic Scan*); por esta razón, aunque el API 1104 no indica literalmente que se puede utilizar la técnica *Phased Array*, ésta se puede emplear bajo este código cumpliendo siempre lo indicado en el parágrafo.

#### **11.4.7.2 Manual *Ultrasonic Weld Testing*.**

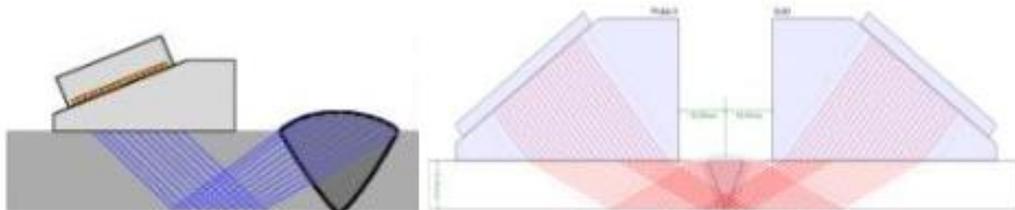


Figura 6. Configuración *Phased Array* Lineal.<sup>18</sup>

Para realizar inspección basada en configuración lineal, se requiere emplear como mínimo palpadores de 60 elementos, el ángulo a emplear deberá ser en todo caso, perpendicular a la orientación del bisel, de esta forma, para soldadura manual donde API 1104 recomienda un bisel de 30°, es más apropiado emplear una configuración lineal de 60°.

Como se muestra en la **figura 6**, el equipo y escáner empleado debe permitir en un solo recorrido inspeccionar desde ambos lados de la soldadura, de esta forma se evaluará apropiadamente todo el volumen de la soldadura. En caso que por limitaciones de la pieza no sea posible, por ejemplo junta tubo-accesorio, se deberá registrar en el informe esta limitación.

Está técnica es conocida en América como SAUT y en Europa como *MPAUT* (*Manual and Encoded Phased Array Ultrasonic Testing*)

### Ultrasonido phased array, configuración sectorial

La técnica de ultrasonido *Phased Array* con configuración **sectorial**, no puede reproducir el comportamiento del ultrasonido manual sobre una soldadura, se basa en la generación de un abanico de ases a partir de un punto fijo.

El barrido sectorial puede escanear en una sola pasada y un solo grupo, soldaduras de gran espesor.

Códigos como el ASME SEC V, art 4, ASME B31.3 CC181 y otros, indican literalmente que se puede emplear este tipo de configuración para la inspección de soldaduras.

<sup>18</sup> "INSPECCIÓN DE SOLDADURAS EMPLEANDO EL ENSAYO DE ULTRASONIDO EN LUGAR DE RADIOGRAFÍA", Suárez Navas, Carlos Enrique, Director de Nuevas Tecnologías, Tecnicontrol S.A., 10 de Marzo de 2011.

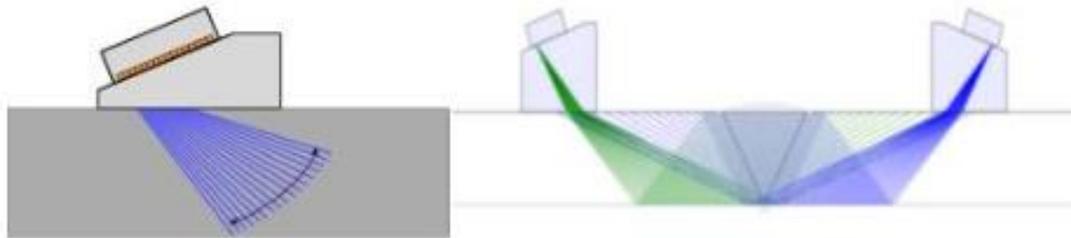


Figura 7. Configuración *Phased Array* sectorial.<sup>19</sup>

El equipo y escáner empleado, deberá permitir realizar en una sola pasada, adquisición de datos desde ambos lados de la soldadura.

Está técnica también es conocida en América como SAUT y en Europa como MPAUT (*Manual and Encoded Phased Array Ultrasonic Testing*).

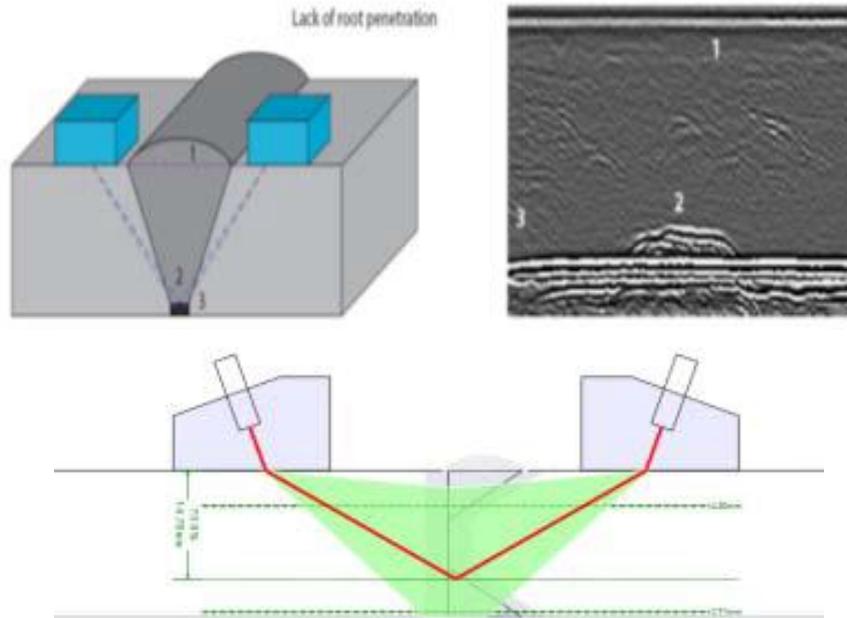
### Técnica tofd (time of flight diffraction)

El ensayo de ultrasonido por TOFD se basa en la detección de ondas de difracción, es un excelente complemento para la inspección pulso eco, ya que se basa en un principio físico diferente.

Dentro de las ventajas de la técnica TOFD se destaca la alta precisión en la medición de la altura de las discontinuidades y la ayuda que brinda para caracterizar el tipo de discontinuidad.

Como desventaja, la técnica tiene zona muerta cerca de la presentación de la soldadura, en esta zona existe la posibilidad de no detectar apropiadamente las discontinuidades, es por esta razón que no se recomienda como única técnica de inspección, si no acompañando a configuraciones *Phased Array* lineal, sectorial o discriminación de zonas del AUT.

<sup>19</sup> "INSPECCIÓN DE SOLDADURAS EMPLEANDO EL ENSAYO DE ULTRASONIDO EN LUGAR DE RADIOGRAFÍA", Suárez Navas, Carlos Enrique, Director de Nuevas Tecnologías, Tecnicontrol S.A., 10 de Marzo de 2011.



**Figura 8.** Técnica complementaria TOFD.<sup>20</sup>

## 1.7.2. Técnicas de caracterización de los materiales

### Análisis químico

El análisis químico determina la composición química de un material o muestra. Cuando una muestra completamente desconocida es analizada, el primer objetivo es por lo general determinar qué sustancias están presentes en ella o en su defecto, determinar cuáles impurezas están presentes en una muestra dada, o tal vez de confirmar que ciertas impurezas especificadas están ausentes. Este proceso hace referencia a un análisis cualitativo y está fuera del alcance de especificar las cantidades presentes.

<sup>20</sup> "INSPECCIÓN DE SOLDADURAS EMPLEANDO EL ENSAYO DE ULTRASONIDO EN LUGAR DE RADIOGRAFÍA", Suárez Navas, Carlos Enrique, Director de Nuevas Tecnologías, Tecnicontrol S.A., 10 de Marzo de 2011.

Después de haber determinado la naturaleza de los constituyentes de una muestra dada, el siguiente paso es conocer la cantidad de cada componente, o de los componentes especificados, que se encuentran presentes. Tales determinaciones se basan en la filosofía de un análisis cuantitativo, y existen una variedad de técnicas para dar a conocer esta información.

## **Metalografía**

Es la ciencia que estudia las características estructurales o constitutivas de un metal o aleación relacionándolas con las propiedades físicas y mecánicas. Entre las características estructurales están el tamaño de grano, forma y distribución de las fases que comprenden la aleación y las inclusiones no metálicas, así como la presencia de segregaciones y otras irregularidades, que profundamente pueden modificar las propiedades mecánicas y el comportamiento general de un metal. Mucha es la información que puede suministrar un examen metalográfico. El principal instrumento, para la realización de un examen metalográfico, es el microscopio metalográfico, como el que se muestra en la figura 1.1, con el cual es posible examinar una muestra con aumentos que varían entre 50X y 2000X.

El examen metalográfico tiene como objeto establecer el estado de un metal en un instante dado en su vida. Puesto que el estado (E) de un metal o una aleación de composición conocida está determinado por su integridad (i) y su estructura (e), es decir puesto que se cumple  $E=f(i, e)$ , resulta que el examen metalográfico, concretamente, persigue el estudio de la integridad y estructura de un metal o de una aleación dada.

### **1.7.3 Análisis por el método de Elementos Finitos**

La técnica de análisis de elementos finitos (FEA) se basa en la división de una geometría en la que una ecuación derivada parcialmente para un campo escalar o vectorial, tiene que ser resuelta en un dominio físico, en pequeños elementos, teniendo en cuenta las ecuaciones de campo, elementos de contorno y fuentes de campo en cada elemento.

Comúnmente, esta técnica es muy utilizada en aplicaciones de ingeniería debido a que muchos problemas físicos se formulan por medio de la solución de una ecuación derivada parcialmente, cuya solución es el primer paso para modelar este problema físico (transferencia de calor, electromagnetismo,

análisis de esfuerzos en estructuras, etc). Esta técnica se aplica en herramientas de software comerciales nombradas herramientas de análisis de elementos finitos, para problemas físicos de propósito en general.

## 2. ANÁLISIS DE FALLAS

### 2.1. EXAMEN VISUAL Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En la **figura 8** se muestra la pieza de transición, hacia la izquierda en la zona **L**, ocurre la combustión de gas, en el centro la inyección del arotar con otros aditivos, de modo que en la zona derecha **R** se desarrolla la reacción para la obtención del negro de humo. En la **figura 9** se indica la zona que está agrietada y que provocó el paso del agua hacia la zona de reacción, justamente en la zona de unión del acero inoxidable austenítico en lámina rolada con el acero del cuerpo del inyector, también de acero inoxidable.

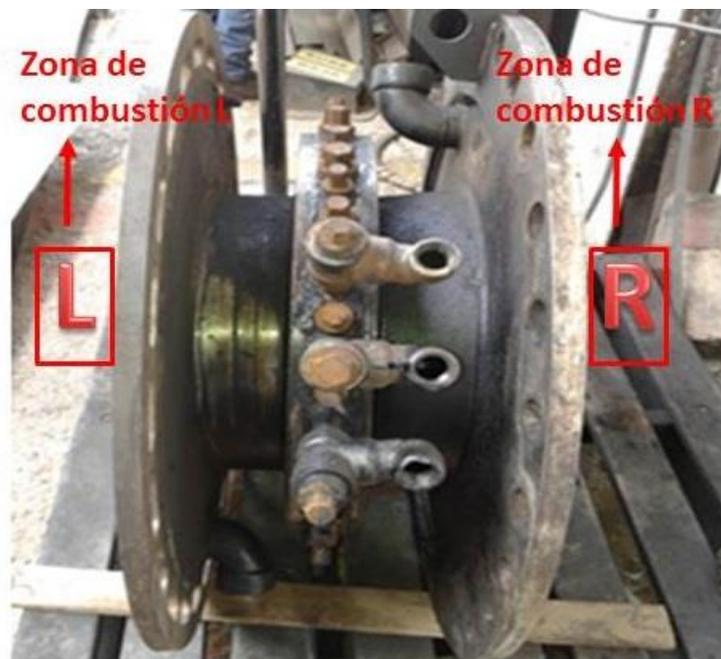


Figura 9. Pieza de transición



**Figura 10.** Vista por la zona de reacción. Evidencia de grieta.

La **figura 10**, evidencia la deformación plástica de la pared de acero inoxidable hacia el interior del reactor, zona cercana a la macrogrieta detectada. La **figura 11** muestra la zona de donde se extrajo una parte del acero conteniendo la grieta, para ello se utilizó el corte por plasma.

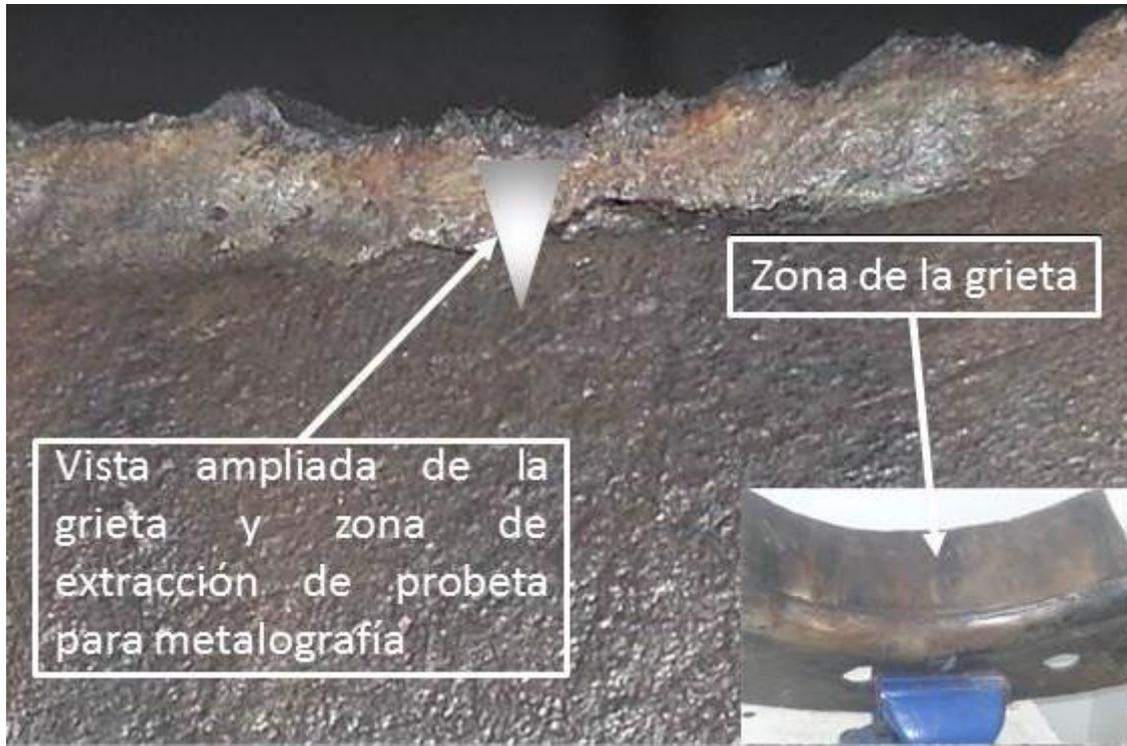


**Figura 11.** Evidencia de deformación plástica hacia el interior del reactor.



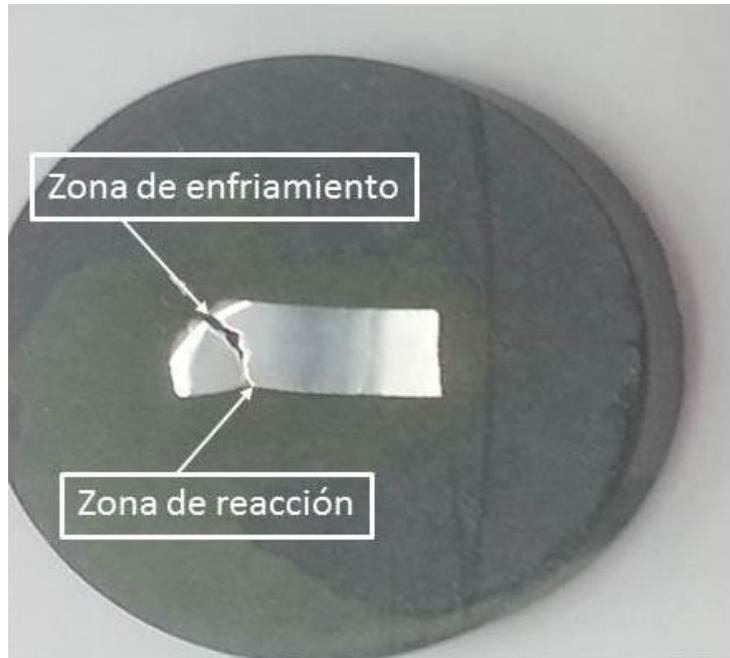
**Figura 12.** Zona de extracción con la grieta.

La **figura 12** muestra la macro grieta longitudinal observada desde la zona caliente de reacción y formada en la ZAT del cordón de soldadura, la raíz de la unión queda para el otro lado correspondiente a la zona de enfriamiento por agua. Para el estudio metalográfico de la sección transversal de la unión soldada se realizó la extracción de una probeta cuya macrografía se ofrece en la **figura 15**.



**Figura 13.** Vista de la grieta por la zona interior del acero AISI 316 Soldado y que hace contacto la zona de reacción del Arotar a elevadas temperaturas.

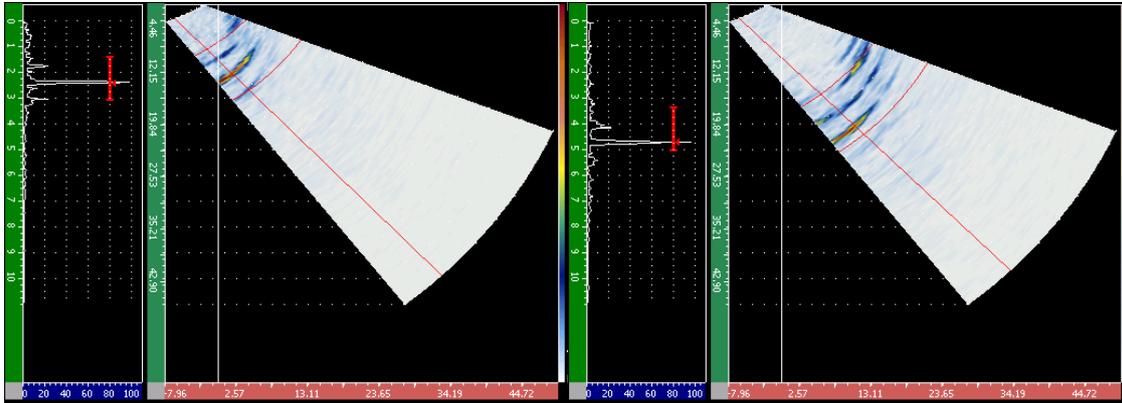
La **figura 13** muestra una macrografía de la probeta extraída de la zona agrietada, se muestra el metal de aporte separado del metal base por la macrogrieta longitudinal que se origina del lado de la zona de enfriamiento a partir de un defecto de soldadura, falta de penetración, el que constituye un concentrador de tensiones para la unión, la grieta avanzó hasta salir al lado de la zona de reacción. La falta de penetración en la soldadura MIG de las láminas de acero inoxidable no sólo aparece en esta zona, hay varias zonas con este defecto lo que constituye una causa importante que ha contribuido a la falla y se debe a errores en el proceso de soldadura y la falta de control de la calidad del proceso antes de colocar la pieza. Con un análisis de control por ENDs se detectan estos defectos a tiempo y se puede corregir.



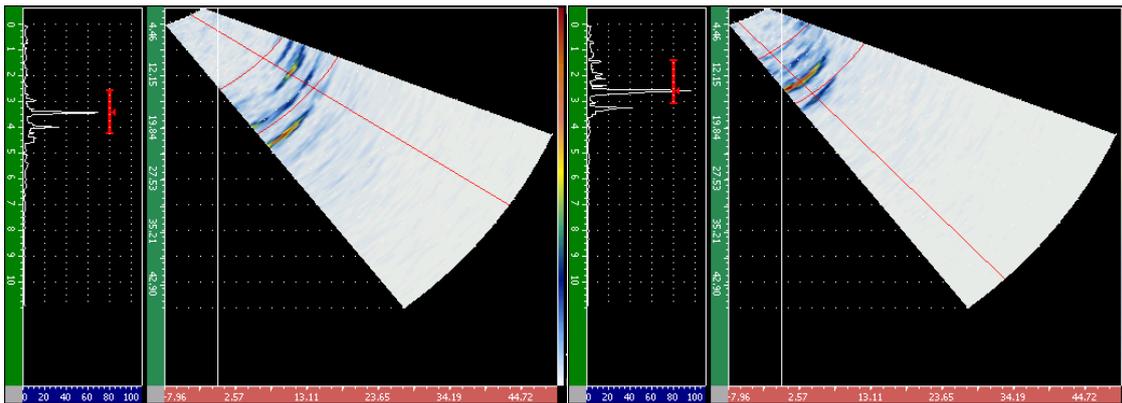
**Figura 14.** Corte perpendicular a la grieta vista en la figura 12. Muestra la zona del metal de aporte, la grieta y el metal base a la derecha.

## 2.2. INSPECCIÓN ULTRASÓNICA

Luego de la inspección visual, se procedió a realizar ultrasonido bajo la técnica phase array (UTPA), con la cual se evidenciaron defectos adicionales a la grieta presente, asociados a falta de penetración en más del 90% de la totalidad de las juntas soldadas de ese mismo lado (el que acopla con el reactor principal). Del lado contrario (el que acopla con el quemador), no hubo hallazgos relevantes.



**Gráfica 4.** Representación gráfica de los extremos de la grieta. Con el equipo se evidencia que cubre todo el espesor de la lámina.



**Gráfica 5.** Defectos asociados a falta de penetración en la raíz de los cordones.

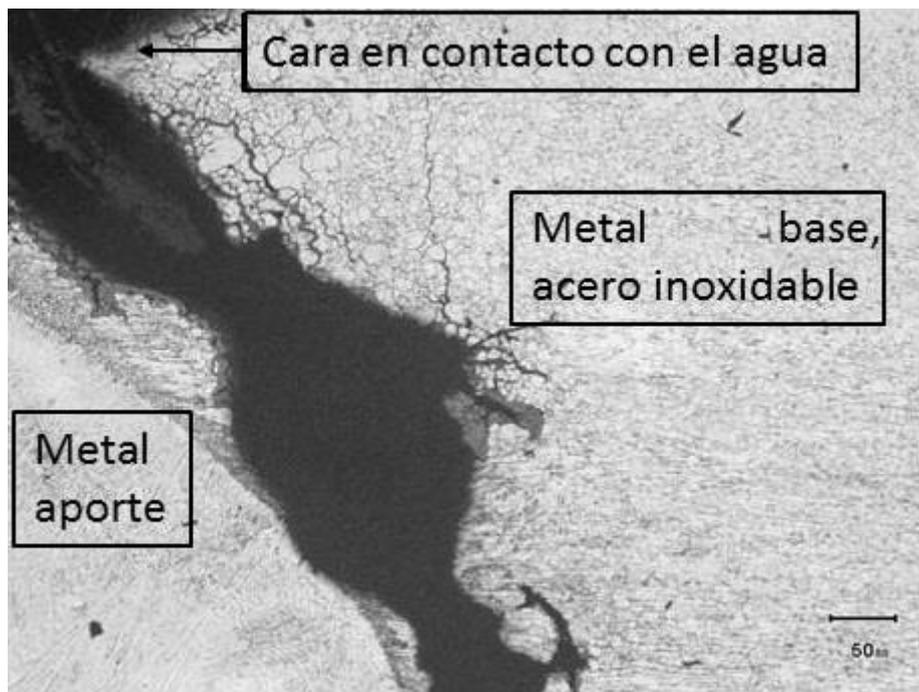
### 2.3. ANÁLISIS METALOGRÁFICO

En las **figuras 14, 15, 16 y 17** se muestran micrografía de las zonas de la unión agrietada, luego del ataque con reactivo De Vilella. En las figuras 16 y 17 se aprecia como la macrogrieta avanzó desde la zona de la raíz del cordón longitudinalmente en la zona de transición y de sobrecalentamiento del metal base, a la izquierda se define claramente la estructura del metal de aporte y a la derecha el acero austenítico agrietado en la zona afectada térmicamente con cierto crecimiento del grano por zonas.

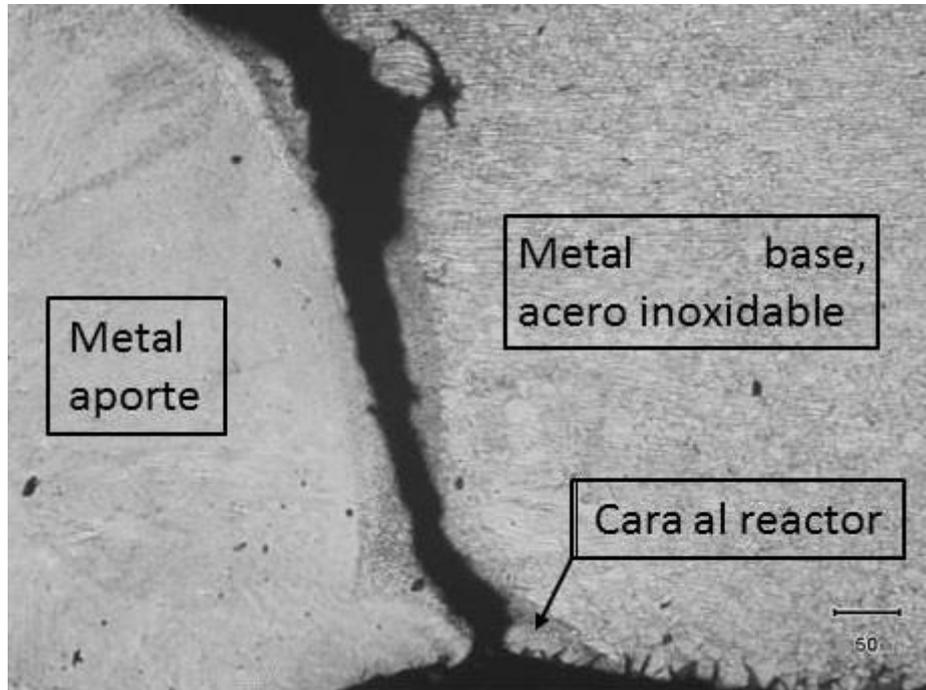
A partir de la macrogrieta se desarrollan micro grietas intercristalinas hacia el interior del acero austenítico, son típicas grietas bajo esfuerzo (Stress

Corrosion Cracking). El agrietamiento por corrosión bajo tensión y su mecanismo intercrystalino en este caso se observa mejor en las **figuras 16 y 17** con mayores aumentos.

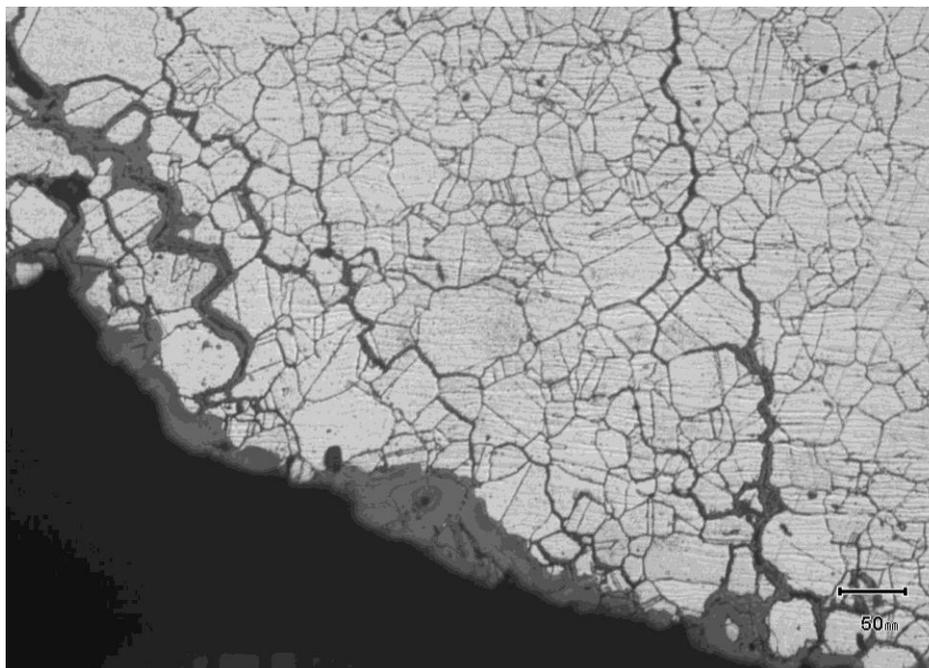
Se señala que fuera de los procesos de soldadura aparecen zonas del acero inoxidable en la superficie en contacto con las altas temperaturas y productos de la reacción con grietas intercrystalinas que avanzar hacia el interior de la pared. Si sólo en esta pequeña sección extraída se aprecian es muy probable que hayan muchas zonas afectadas por este tipo de grietas que no están relacionadas con el proceso de soldadura, en la **figura 18** se evidencian estas grietas.



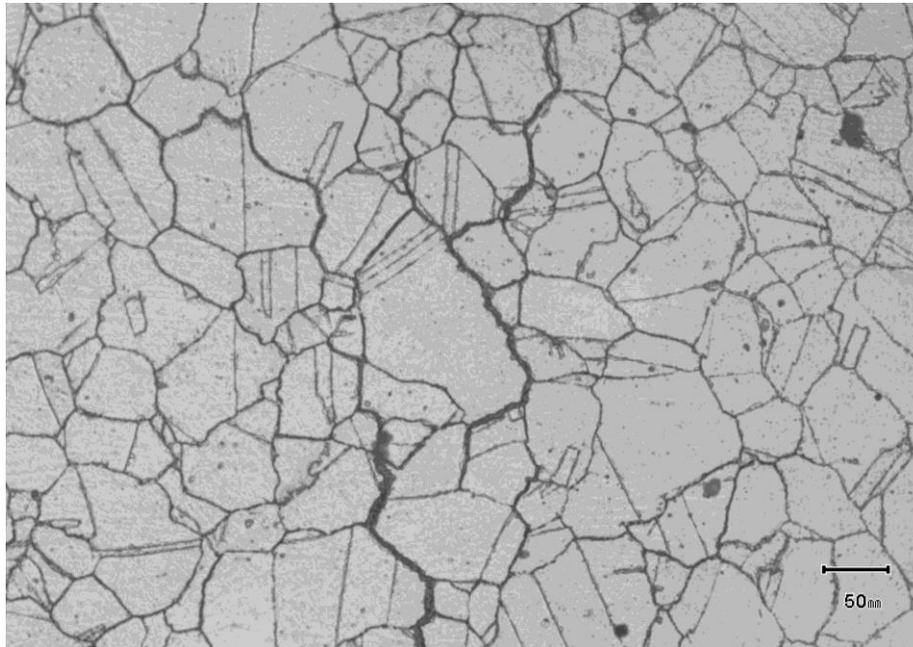
**Figura 15.** Micrografía con 50 X mostrando la zona agrietada del lado la zona de enfriamiento por agua.



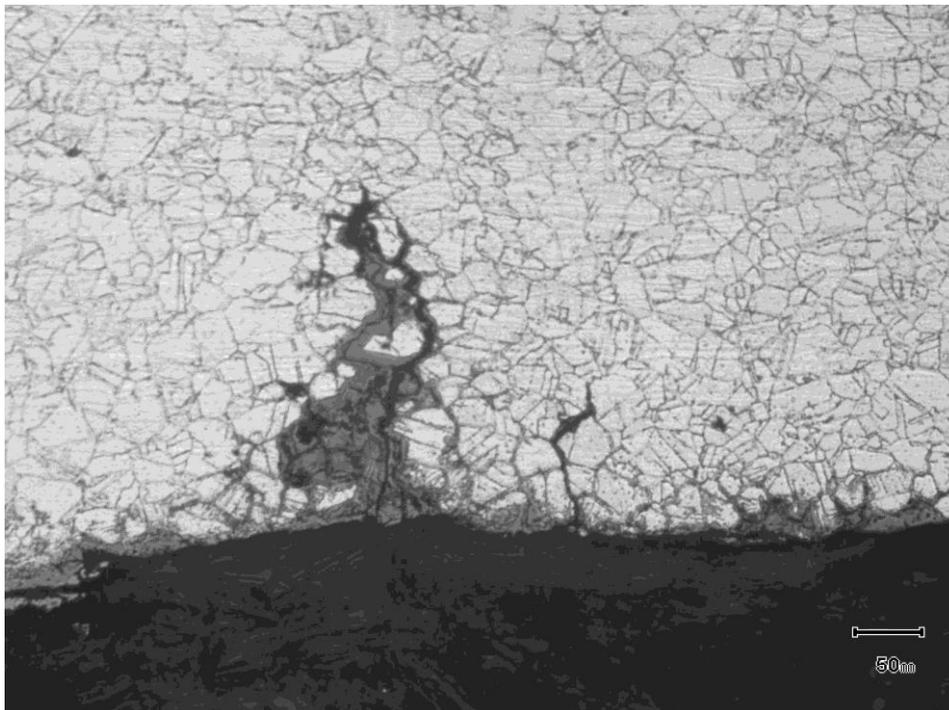
**Figura 16.** Micrografía con 50 X mostrando la zona agrietada del lado la zona de reacción caliente.



**Figura 17.** Micrografía a 100 X del metal base de acero inoxidable, con grietas intercristalinas formadas mediante SCC (Stress Corrosion Cracking).



**Figura 18.** Micrografía a 100 X del metal base de acero inoxidable, mostrando en avance de las grietas intercristalinas formadas mediante el mecanismo de SCC (Stress Corrosion Cracking).



**Figura 19.** Micrografía con 100 X, mostrando grietas intercristalinas formadas en zonas del acero inoxidable que están en contacto con los procesos de reacción, alejadas del cordón.

## 2.4. ANÁLISIS QUÍMICO

Se realiza análisis químico a las muestras obtenidas en ambas zonas del reactor de transición, es decir, tanto de la zona afectada que acopla con el reactor principal, como de la zona contraria que acopla con el quemador. Los análisis realizados son por Espectrometría Óptica y en las tablas siguientes se presentan los resultados.

|          |       |       |       |        |       |       |        |       |
|----------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|
| Elemento | C     | Si    | Mn    | S      | P     | Ni    | Cr     | Mo    |
| % p/p    | 0.064 | 0.421 | 1.436 | <0.001 | 0.019 | 7.922 | 18.215 | 0.043 |
| Elemento | Cu    | Al    | Sn    | Ti     | V     | Sb    | W      | Co    |
| % p/p    | 0.364 | 0.011 | 0.005 | 0.002  | 0.049 | 0.014 | 0.013  | 0.166 |

**Tabla 7.** Muestra de material del lado afectado.

|          |       |       |       |        |       |       |        |       |
|----------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|
| Elemento | C     | Si    | Mn    | S      | P     | Ni    | Cr     | Mo    |
| % p/p    | 0.060 | 0.433 | 1.429 | <0.001 | 0.020 | 7.825 | 17.819 | 0.042 |
| Elemento | Cu    | Al    | Sn    | Ti     | V     | Sb    | W      | Co    |
| % p/p    | 0.372 | 0.012 | 0.005 | 0.001  | 0.050 | 0.013 | 0.003  | 0.165 |

**Tabla 8.** Muestra de material del lado contrario.

Estos valores, en ambas muestras, corresponden al acero austenítico AISI 304L.

## 2.5 ANÁLISIS TENSIONAL A TRAVÉS DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF) UTILIZANDO EL SOFTWARE SOLID EDGE

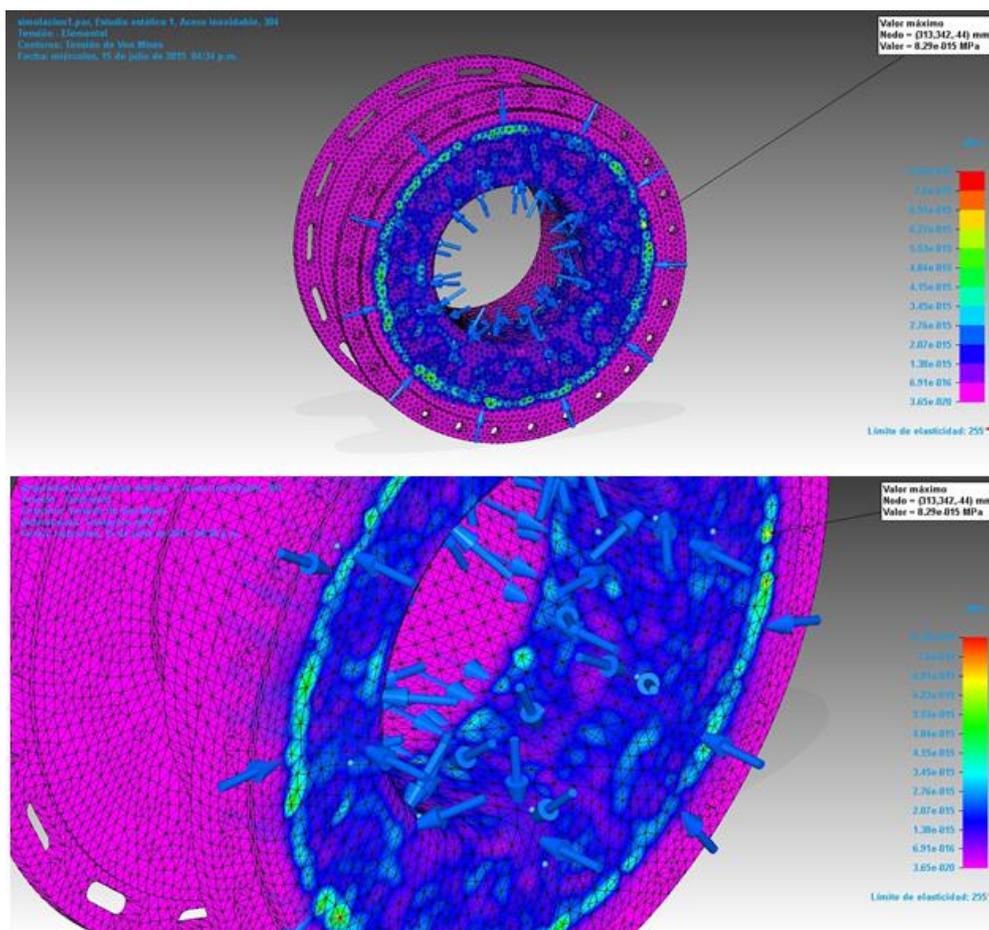
Después del análisis por elementos finitos de la geometría de la de la pieza de transición del reactor, teniendo en cuenta la presión del agua de refrigeración utilizada (58PSIG) y la temperatura a la cual trabaja el sistema (800°C), se obtienen los resultados ilustrados con una distribución de esfuerzos densamente localizada en los cordones de soldadura como es esperado debido a la evidencia de falta de penetración de la misma, dando lugar a la presencia del fenómeno principal de causa de falla: corrosión bajo tensión.

No obstante, los estados tensionales no son determinantes puesto que las tensiones que provocan los esfuerzos presentes tampoco son lo

suficientemente altas como para comprometer la integridad de la pieza, a pesar de los errores cometidos durante el proceso de soldadura.

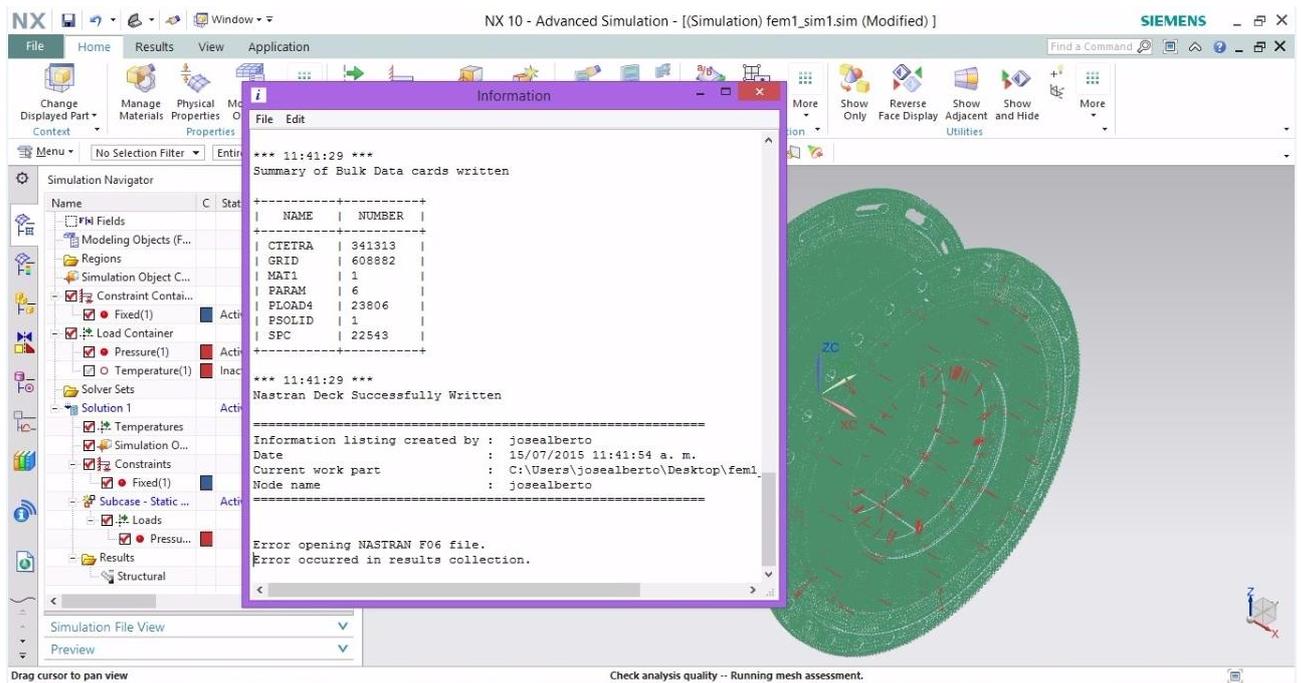
Analizando los resultados obtenidos en la simulación presentada en la **figura 19**, observamos que los valores de esfuerzos presentes no son elevados, pero sí densamente localizados en el cordón; confirmando que los esfuerzos a los que está sometida normalmente la pieza en su sitio de trabajo no provocaron la rotura de esta; así mismo, como se sabe, para que el fenómeno de corrosión bajo tensión tome lugar no es necesario que existan esfuerzos significativamente altos, siendo esto lo ocurrido en la pieza de transición, donde un proceso inadecuado de soldadura aplicado provocó la rotura del cordón y por ende la falla del sistema y parada inesperada de la planta.

La simulación se llevó a cabo con la asesoría del Ingeniero Carlos Manga.



**Figura 20.** Resultados obtenidos a través de la simulación generada en el software Solid Edge de los estados tensionales de la pieza de transición

Cabe resaltar, que la simulación en un principio se intentó realizar con el programa NX9, pero por la falta de potencia de cómputo no pudo terminarse la ejecución, habiéndose realizado el mallado y aplicado las cargas correspondientes. La **Figura 20** brinda evidencia de esto.



**Figura 21.** Evidencia de fallo en simulación realizada en el programa NX9.

### 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Según la información proporcionada por CABOT COLOMBIANA S.A., como una de las principales consideraciones para iniciar el estudio de las causas de fallas en el reactor, el material de fabricación de la pieza de transición debía ser acero inoxidable AISI 316L, pero los resultados del análisis químico evidencian que es AISI 304L; éste último, a pesar de ser austenítico de bajo carbono para limitar la formación del carburo de cromo en los límites de grano y reducir así la sensibilidad a la corrosión intercrystalina, sobre todo en las uniones soldadas, no es el recomendado para las condiciones de trabajo de este reactor, por la presencia de productos corrosivos y de reacción química.

La macro grieta que se observa está asociada a incorrecciones en los procesos y tecnología de soldadura, en esta zona soldada y en otras hay falta de penetración, todo lo cual crea concentradores de tensiones que contribuyen al incremento de esfuerzos en la zona de la unión y el metal base durante el funcionamiento de la pieza; este problema reviste mayor importancia si se toma en cuenta las condiciones de trabajo del acero inoxidable soldado, con un elevado gradiente de temperatura entre la zona caliente del reactor y la zona fría con agua de enfriamiento lo que crea tensiones variables de origen térmico y mecánico. La macro grieta longitudinal está justamente en la zona de transición de la unión, más bien en la zona de sobrecalentamiento del metal base.

Se desarrollan grietas secundarias intercrystalinas hacia el interior del acero AISI 304 L están condicionadas por la presencia de hidrógeno, azufre y oxígeno y los esfuerzos propios de las condiciones de trabajo del sistema, estas responden al mecanismo de Corrosión bajo tensión (SCC).

Fuera de la unión soldada también se observaron grietas intergranulares que crecen en el acero 304 L desde la superficie de contacto con los productos de la reacción a altas temperaturas. Se requiere profundizar en este fenómeno que no está ligado a las fallas en la soldadura y puede afectar seriamente el reactor a largo plazo

Los ensayos por ultrasonido y el análisis por el MEF corroboran la existencia de falta de penetración en las uniones soldadas y el efecto dañino que provocan estos errores en la concentración de tensiones que generan grietas, contribuyendo además a la corrosión bajo esfuerzos.

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Finalmente, el análisis de los resultados obtenidos a través de los ensayos y métodos permitió concluir lo siguiente:

- La causa fundamental de la falla es la falta de penetración en el proceso de soldadura que provocan la presencia de concentradores de tensiones. Esto estará relacionado con otras causas humanas y latentes que pueden determinarse a través de un análisis causa raíz (RCA), por lo que se recomienda realizar un control minucioso del proceso de soldadura llevado a cabo y mantener los lineamientos establecidos para lograr uniones soldadas de excelente calidad.
- El acero usado no es el informado (AISI 316L), sino otro (AISI 304L) que es menos resistente a determinados procesos de corrosión que el evidenciado.
- Se observan en el microanálisis, grietas intercristalinas hacia el interior del material cuyo mecanismo principal es corrosión bajo tensión, fomentadas por las condiciones agresivas de operación (atmósfera y altas temperaturas). Se recomienda realizar un estudio generalizado de la pieza para evaluar los estados microestructurales de toda su integridad.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- **Mendivil, J. D., (2012).** Simulación del proceso de producción de negro de humo utilizando el programa UNISIM™. Universidad de San Buenaventura Seccional Cartagena.
- **Ortega, S. M., Fernández, K. M., Ochoa, T. S. (2011).** Diseño de una propuesta de mejoramiento de la confiabilidad del proceso de producción de negro de humo en CABOT COLOMBIANA S.A., a partir de herramientas de gestión de confiabilidad. Universidad Tecnológica de Bolívar.
- **Askeland, D., (1999).** Ciencia e Ingeniería de los Materiales, 3ra ed. México, Ed. Paraninfo.
- **Gulbrandsen, S., (2012).** Overview of Stress Corrosion Cracking in Stainless Steel: Electronic Enclosures in Extreme Environmental Conditions. Georgia Institute of Technology
- **Atlas specialty metals (2013).** Technical Handbook of Stainless Steels. Recuperado de <http://www.atlassteels.com.au/documents/Atlas%20Technical%20Handbook%20rev%20Aug%202013.pdf>
- **The Stainless Steel Information Center (2007).** Stainless steel overview: Applications. Washington, DC, EE.UU. Recuperado de [http://www.ssina.com/overview/app\\_intro.html](http://www.ssina.com/overview/app_intro.html)
- **The Stainless Steel Information Center (2007).** Stainless steel overview: Features and benefits. Washington, DC, EE.UU. Recuperado de <http://www.ssina.com/overview/features.html>
- **The Stainless Steel Information Center (2007).** Stainless steel overview: Features and benefits. Washington, DC, EE.UU. Recuperado de <http://www.ssina.com/corrosion/general.html>

- **Suministros Técnicos S.A. (2010).** Acero Inoxidable AISI 304. La lima de Cartago, Costa Rica. Recuperado de <http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/AISI%20304.pdf>
- **Gutiérrez, A. M., (2013).** Revista MetalActual. Ed. 28. Problemas frecuentes en soldadura GTAW – TIG. Bogotá, Colombia. Recuperado de [http://www.metalactual.com/revista/14/Soldadura\\_TIG.pdf](http://www.metalactual.com/revista/14/Soldadura_TIG.pdf)
- **Industrias Tecnológicas S.A. (2014).** Ensayos no destructivos. Bogotá D.C., Colombia. Recuperado de <http://www.indutecsa.com/index.php/productos/nodestructivos>
- **Inspección y Diagnóstico Técnico (2011).** Inspección Visual. Bogotá D.C., Colombia. Recuperado de <http://www.isotec.com.co/portal2/index.php?id=50>
- **Guzmán, C. F. (2013).** Análisis de aceros por microscopía óptica. Instituto Politécnico Nacional. México D.F., México.
- **TUVNORD (2009).** Otras técnicas de ensayos no destructivos y sus aplicaciones. Madrid, España. Recuperado de <http://www.tuv-nord.com/es/ensayos-no-destructivos/otras-tecnicas-ensayos-no-destructivos-end-504.htm>
- **F.A. López, A.LópezDelgado, F.J.Alguacil y J. Manso, (2007).** Situación actual del tratamiento de neumáticos fuera de uso y posibilidades de obtención de negro de humo de alta pureza. Laboratorio de Innovación y Reciclado de Materiales. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM). CSIC. Avda. Gregorio del Amo, 8. 28040 Madrid, Química Industrial Procesa, S.L. Paseo de la Rinconada, 8. 28023 Madrid, Madrid, España.
- **G. H. Jeffery, J. Bassett, J. Mendham, R. C. Denney (1989).** Quantitative Chemical Analysis, 5ta Ed. London, England. Vogel's.

- **Ródenas, M. E. (2008).** El análisis por elementos finitos: Una metodología muy reciente en economía. Universidad Complutense de Madrid. Recuperado de <http://www.uv.es/asepuma/XIV/comunica/117.pdf>
- Información suministrada por CABOT COLOMBIANA S.A.
- Informe técnico realizado por la empresa Ingeniería y Ensayos de Caribe S.A.S. como resultado de consultoría solicitada por CABOT COLOMBIANA S.A. 2014.