

**ESTUDIO DE ABOLLADURAS EN LINEAS DE INYECCIÓN DE AGUA BAJO  
NORMA API 579-1/ASME FFS-2016**

**HERNANDO ANDRES DIAZ  
MARTHA LILIANA JAIMES GARCIA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA Y CIENCIA DE LOS  
MATERIALES  
ESPECIALIZACION ESPECIALIZACIÓN EN INTEGRIDAD DE EQUIPOS Y  
DUCTOS  
BUCARAMANGA  
2017**

**ESTUDIO DE ABOLLADURAS EN LINEAS DE INYECCIÓN DE AGUA BAJO  
NORMA API 579-1/ASME FFS-2016**

**HERNANDO ANDRES DIAZ  
MARTHA LILIANA JAIMES GARCIA**

**Monografía de grado presentada como requisito para optar el título de Especialista en  
Integridad de Equipos y Ductos**

**Director  
IVAN URIBE PEREZ  
M.Sc. En Ciencias Aplicadas**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA Y CIENCIA DE LOS  
MATERIALES  
ESPECIALIZACION ESPECIALIZACIÓN EN INTEGRIDAD DE EQUIPOS Y  
DUCTOS  
BUCARAMANGA**

**2017**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por permitirme disfrutar de este espacio lleno de conocimiento y crecimiento profesional

A mi familia por su apoyo incondicional y brindarme el apoyo moral necesario para sacar este proyecto adelante.

A la Universidad Industrial de Santander en especial a la escuela de ingeniería metalúrgica y ciencia de los materiales por contar con tan excelentes personas y profesionales que gracias al compartir de su experiencia y saber me enseñaron nuevas rutas del saber.

A todos aquellos amigos que de una u otra forma contribuyeron a que estoy hoy sea una realidad.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION .....	13
1. OBJETIVO .....	15
2. ALCANCE .....	15
3. MARCO TEORICO .....	16
4. EVALUACIÓN DE ABOLLADURAS SEGÚN API 579-1/ASME FFS-2016.....	22
5. ANÁLISIS DE APTITUD PARA EL SERVICIO DE TUBERÍA DE 36” DE DIÁMETRO EXTERNO CON DEFECTOS TIPO ABOLLADURAS .....	28
6. RECOMENDACIONES.....	41
7. CONCLUSIONES .....	43
BIBLIOGRAFIA .....	44
ANEXOS.....	46

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Datos generales del componente de tubería.....	28
Tabla 2. Datos operacionales del componente de tubería.....	29

## LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Esquema de procesamiento de crudo. ....	17
Ilustración 2. Esquema de una abolladura. ....	19
Ilustración 3. Procedimiento para el Análisis de Nivel 1. ....	23
Ilustración 4. Procedimiento para el Análisis de Nivel 2. ....	25
Ilustración 5. Representación de las Abolladuras Generadas por los Apoyos. ....	29
Ilustración 6. Comportamiento de la Presión del Sistema. ....	30
Ilustración 7. Comportamiento de la Temperatura del Sistema. ....	30
Ilustración 8. Comportamiento del Flujo del Sistema. ....	31
Ilustración 9. Inspección por Partículas Magnéticas en Abolladuras. ....	31
Ilustración 10. Flujograma Criterio Aceptación ASME B31.4. ....	33
Ilustración 11. Esfuerzos Residuales en Defectos Tipo Abolladuras 36in OD. ....	39
Ilustración 12. Diseño propuesto para reparar y prevenir daños por peso muerto en apoyos existentes o futuros. ....	42

## **LISTADO DE ANEXOS**

Anexo A. Plantilla para análisis de datos

Anexo B. Simulación por elementos finitos

Anexo C. Datos operacionales de la línea

## RESUMEN

**TITULO: ESTUDIO DE ABOLLADURAS EN LINEAS DE INYECCIÓN DE AGUA BAJO NORMA API 579-1/ASME FFS-2016<sup>1</sup>**

**AUTORES: HERNANDO ANDRES DIAZ; MARTHA LILIANA JAIMES\*\***

**Palabras Clave:** Defecto, hidrocarburos, sistemas de extracción, tuberías, soldadura, amenaza, corrosión, fatiga, abolladura, mecánica, análisis, evaluación.

En Colombia no existe una guía de consulta a nivel gerencial que permita agilizar o facilitar la toma de decisiones en el momento de evaluar, analizar, reparar o sacar de servicio una tubería. En muchos de los casos los gerentes de las empresas no tienen necesariamente los conocimientos técnicos de las normas adecuadas para estas evaluaciones, lo cual implica a llevar a cabo estudios que toman bastante tiempo y recursos que en ocasiones por la premura de la operación no se tienen, entonces se opta por la evaluación de costos de alternativas para reparaciones que muchas veces no son necesarias de forma inmediata. Con este trabajo se elaboró una plantilla en Excel que permite establecer la operatividad del ducto, por medio de cálculos matemáticos y criterios de aceptación basados en ASME B31.4 y API 579-1/ASME FFS-2016, la cual puede ser utilizada como herramienta en la toma de decisiones de manera oportuna.

Este documento es de utilidad para los gerentes de empresas e ingenieros encargados de la operación de plantas, ya que permitiría de una manera rápida continuar o no la operación segura de una tubería y tomar las decisiones en el menor tiempo posible con las mejores acciones costo efectivas de mantenimiento.

---

<sup>1</sup> Monografía

<sup>11</sup>Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director M.Sc. Iván Uribe Pérez

## ABSTRACT

**TITLE: STUDY OF SCREWS IN WATER INJECTION LINES UNDER API 579 STANDARD.<sup>2</sup>**

**Keywords:** Defect, hydrocarbons, extraction systems, piping, welding, threat, corrosion, fatigue, dent, mechanics, analysis, evaluation.

In Colombia there isn't a guide to consult about management level in order to get easier make decisions when take place the assessment to define if a pipeline is allowable for continuous operation or if is necessary to do any repair job usually in the most os the cases in the companies the managers (chief executive officer) don't have the technical knowledges. They don't know about the codes for integrity assessments. In this way carrying up integrity assessments take time and engineering resources, Sometimes it is given for the relevance for continuum operating, so the decisions are focused to costs assessments for the repair alternatives, even the most of times is not required to repair immediately. As part of this job an excel spreadsheet was developed in order to define for computation methods and acceptance criteria according to ASME B31.4 and API 579 codes. It can be used as a tool to make decisions in a sharp time this paper is useful for the managers and engineers encharged of the plant's operations, because it allows in a fast way to do an integrity assessments in order to define the aptitude for the continuous safe operation of a pipeline or not. And in the same way make decisions as soon as possible with the best cost-benefits alternatives for the maintenance.

---

<sup>2</sup> Monograph

<sup>22</sup> Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director M.Sc. Iván Uribe Pérez

## INTRODUCCION

Para garantizar la integridad y operación segura de tuberías para transporte de hidrocarburos y productos generados en el proceso de su extracción y transformación, se requiere la combinación de diseños adecuados, una selección apropiada de materiales, estudios que proyecten o estimen la vida útil del equipo y en general buenas prácticas de ingeniería. Sin embargo, las tuberías están expuestas a fallas y dentro de las causas más comunes de estos daños fallas en las tuberías se encuentra la corrosión, los daños mecánicos y en algunos países causas externas, como el vandalismo o problemas de orden público. Es así como se hace entonces necesario definir y aplicar métodos de evaluación que permitan determinar la gravedad de estos daños.

Los daños a la tubería ocurren generalmente durante el montaje, la puesta en marcha del servicio y es probable que existan daños asociados a los procesos de fabricación. Estos daños crecen y se vuelven más críticos durante la vida útil del activo, lo que hace necesario una evaluación de la "aptitud para el servicio" para determinar si la tubería es segura para la operación y bajo qué condiciones.

Como consecuencia, en los últimos 20 años se han desarrollado una serie de métodos matemáticos y analíticos para evaluar los daños en tuberías. Algunos de estos métodos se han incorporado en orientación de la industria del petróleo, otros se pueden consultar en publicaciones producto de procesos de investigación en laboratorios. Es así como la presente monografía tiene como propósito servir de guía, a estudiantes e ingenieros experimentados, en el uso y la aplicación de cada uno de los niveles de evaluación de abolladuras en tubería, que describe la norma API 579-1/ASME FFS-2016.

Mediante el uso de plantillas en Excel se presenta un resultado de evaluación de una tubería usando los métodos matemáticos descritos en las normas ASME B31.4 y API 579-1/ASME FFS-2016. Igualmente se desarrolla un caso de estudio tomando como ejemplo la construcción de líneas para transporte de fluidos sin una adecuada selección de soportes y en algunos casos sin el uso de los mismos.

Para el caso de estudio del presente documento, se tomó como ejemplo el transporte de agua desde una planta de tratamiento hasta donde se hace la disposición. La tubería objeto de estudio es de acero al carbono API5L Gr-B., con un diámetro de 36", una longitud aproximada de 3,5km. En cuanto al tendido de la tubería sobre el terreno se construyeron 120 apoyos tipo "marco H", donde se evalúa cada uno de los puntos de apoyo de la tubería al soporte, debido a que en ninguno de estos se instaló algún tipo de refuerzo para evitar daños sobre la tubería.

Al inicio del estudio se valoró cada uno de estos puntos y se obtuvo un criterio de aceptación usando la metodología descrita en la norma ASME B31.4; debido a los criterios conservadores de esta metodología se deciden evaluar algunos puntos usando los tres (3) niveles descritos en la norma API 579-1/ASME FFS-2016, por ultimo mediante graficas se muestra el comportamiento de las abolladuras sobre la tubería al presentarse cambios en la velocidad de corrosión y disminución del espesor.

## **1. OBJETIVO**

Disminuir el riesgo en la operación de tuberías que presentan abolladuras, mediante la evaluación de un Fitness For Service, norma API 579-1/ASME FFS-2016.

### **1.1 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Describir los procedimientos, cálculos, investigaciones relacionadas con la norma API 579-1/ASME FFS-2016 y demás disponibles en la literatura.
- Identificar los aspectos relevantes a aplicar, descritos en la norma API 579-1/ASME FFS-2016 para la identificación y evaluación de abolladuras.
- Proponer un procedimiento para el análisis de abolladuras, según los niveles de evaluación descritos en la norma, implementando hojas de cálculo.

## **2. ALCANCE**

El presente trabajo de monografía desarrollará un estudio de los procedimientos y cálculos de la norma API 579-1/ASME FFS-2016, para evaluar abolladuras, mediante la aplicación de la norma y la elaboración de hojas de cálculo como guía para determinar las ventajas de mantener una tubería en operación y bajo qué condiciones es segura la misma.

### **3. MARCO TEORICO**

#### **3.1 GENERALIDADES SOBRE EL AGUA DE PRODUCCIÓN**

En la extracción del crudo se genera subproductos entre ellos el agua que se encuentra en mayor o menor proporción dependiendo del yacimiento.

El agua residual generada en un campo petrolero tiene dos métodos de disposición; para vertimiento en afluentes de agua natural o para inyección nuevamente en formaciones receptoras.

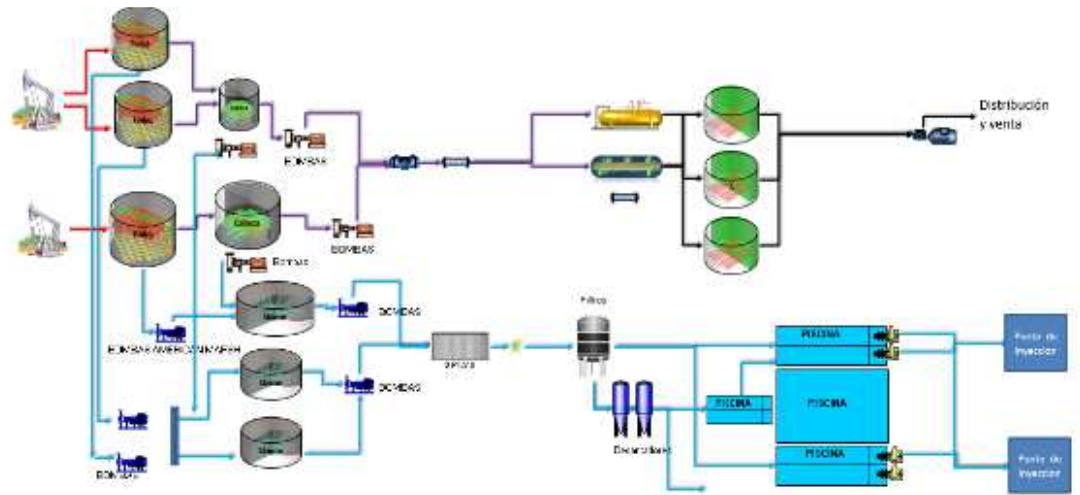
La primera inyección ocurrió accidentalmente cuando el agua, proveniente de algunas arenas acuíferas poco profundas o de acumulaciones de aguas superficiales, se movía a través de las formaciones petrolíferas, entraba al intervalo productor en los pozos perforados e incrementaba la producción de petróleo en los pozos vecinos. En esa época se pensó que la función principal de la inyección de agua era la de mantener la presión del yacimiento y no fue sino hasta los primeros años de 1980, cuando los operadores notaron que el agua que había entrado a la zona productora había mejorado la producción<sup>3</sup>

Estas tuberías al igual que las tuberías que transportan crudo, gas o productos de la refinación se encuentran expuestas a diferentes amenazas las cuales están asociadas al proceso constructivo y de operación.

---

<sup>3</sup> CRUZ, Adriana y VANEGAS, Angélica. Inyección de agua. Villavicencio. Trabajo de grado (técnicos en producción de pozos de petróleos y facilidades). Corporación institucional del petróleo Ltda. 2009

Ilustración 1. Esquema de procesamiento de crudo.



### 3.2 DAÑOS EN DUCTOS

Los ductos presentan diferentes amenazas clasificadas como: dependientes del tiempo donde encontramos corrosión externa, corrosión interna, agrietamiento por corrosión, fatiga y las independientes del tiempo, como lo son daños por terceros, operaciones incorrectas, clima y fuerzas externas, incluye movimientos del terreno, falla aleatoria de equipos, defectos de fabricación y defectos de construcción.

Los daños por terceros, de fabricación y de construcción son daños mecánicos los cuales rebasan los límites de aceptación en la pared del tubo y son designados como “fuera de Norma”. Como son, abolladuras, arrancaduras o remociones de metal, etc.

De acuerdo a estudios realizados se evidencia que la falla más común en las tuberías son los generados por el efecto de corrosión, sin embargo en las tuberías también se presentan fallas por daños o defectos mecánicos lo que hace obligatorio establecer métodos de estudio y control<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> HERNANDEZ, María. y GARCIA, Oscar. Evaluación de defectos en tuberías corroídas por medio del código ASME B31G y la Norma API 579. Trabajo de grado (ingenieros Metalúrgicos). Universidad Industrial de Santander. Facultad de

Las Abolladuras se definen como una depresión que produce una perturbación en la curvatura de la pared de la tubería, esto es causado por el contacto con un cuerpo externo, lo que causa una deformación plástica de la pared del tubo.

La profundidad de una abolladura está definida como la máxima reducción en el diámetro del tubo comparada con el diámetro original; ej. El diámetro nominal menos el diámetro mínimo, esta definición de profundidad de abolladura incluye si esta es originada por una indentación local o cualquier divergencia producida en la sección circular nominal (ej. Falta de redondez)

A continuación se presenta una clasificación de las abolladuras:

- Abolladura Suave: es una abolladura que causa un pequeño cambio en la curvatura de la pared del tubo.
- Abolladura Profunda (kinked): Es una abolladura que causa un cambio abrupto en la curvatura de la pared del tubo, un cambio abrupto en la curvatura se define como uno en cual el radio de la curvatura (en cualquier dirección) de la parte más aguda de la abolladura es mayor o igual a cinco veces el espesor de pared.
- Abolladura Plana: Es una abolladura suave en la que no se observan reducciones de espesor de pared (como grietas o entallas) y no cambia la soldadura circunferencial o longitudinal adyacentes.
- Abolladura Liberada: Es una abolladura que es libre de restablecerse elásticamente (spring back) cuando el indentador es removido y es libre de restablecer su curvatura dependiendo de la variación en la presión interna.
- Abolladura Contenida: Es una abolladura que no es capaz de recuperar su curvatura o restablecerse elásticamente, porque su indentador no ha sido removido. Una roca que está generando una abolladura es un ejemplo de una abolladura contenida.<sup>5</sup>

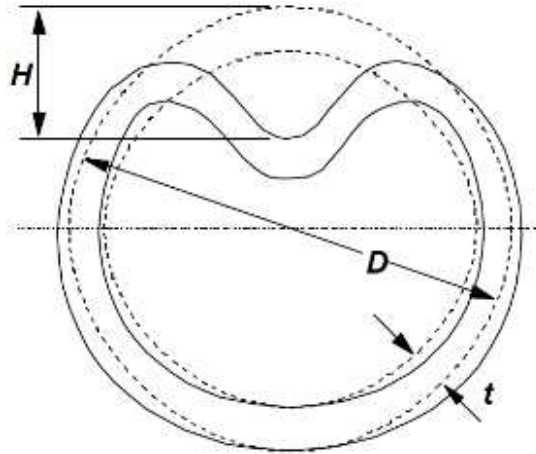
Una abolladura genera una concentración de esfuerzo y presión además de una reducción local del diámetro del tubo. Algunas deformaciones causadas durante el proceso de abollamiento son elásticas, de esta forma cuando el indentador es removido la sección de tubería abollada retoma su forma original, este fenómeno es conocido como “Spring Back”

---

<sup>5</sup> COSHAM, Andrew y HOPKINS, Phil. The effect of dents in pipelines—guidance in the pipeline defect assessment manual. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2004 81(2), 127-139.

Las abolladuras en una tubería pueden generar problemas operacionales, cualquier abolladura presente en una tubería reducirá las tasas de flujo o que obstruya el paso de herramientas inteligentes (ILI – PIGs) o de limpieza, en los casos en donde ellas apliquen

Ilustración 2. Esquema de una abolladura.



Fuente: The effect of dents in pipelines

La literatura registra diversos métodos para una evaluación de la integridad estructural de ductos indentados así como algunos criterios de aceptación/rechazo de tales defectos. Estos métodos se fundamentan en ensayos experimentales, en análisis teóricos, modelamiento numérico y/o en una buena práctica de ingeniería, la selección del método más adecuado depende de la naturaleza y geometría del defecto.

Respecto a la aplicabilidad de técnicas para el manejo de abolladuras, el sistema de transporte de hidrocarburos que sale de Canadá y va hasta Estados Unidos, operado por Enbridge Pipelines Inc., con tuberías de 12" a 48" de diámetro, fabricados con diferentes procesos según la tipología del terreno en el que se encuentra, han llevado a esta compañía a generar un desafiante programa de manejo de abolladuras. El programa incluye estándares tales como CSA Z662-99, ASME B31.4 y B31.8, los cuales proporcionan criterios específicos para la selección de abolladuras que requieren reparación. Adicionalmente Enbridge inició un proyecto para estudiar abolladuras con BMT Fleet Technology de Kanata Ontario, este estudio determinó que la geometría dentada, además de la relación profundidad / diámetro del tubo, afecta la propensión a que una abolladura fallará. El análisis detallado utiliza "Criterios de Caracterización de abolladuras", que fue desarrollado usando su Modelo de Evaluación de Abolladuras por Elementos Finitos, teniendo en cuenta la forma, la geometría de la abolladura, las propiedades del material de la tubería y los datos de la presión histórica para predecir el tiempo hasta la falla de cada una. Esta predicción del tiempo de falla fue

validada con el desarrollo de un modelo y el análisis de ingeniería, el cual determinaría qué abolladuras se seleccionan para la excavación y el análisis. Este modelo que ha proporcionado a Enbridge es una herramienta para optimizar el análisis de abolladuras, lo cual prevé generar mejoras en las normas existentes.<sup>6</sup>

En cuanto al estudio de las características geométricas y la distribución de la deformación en la tubería abollada y presurizada, Ramezani et al (2013), hicieron una investigación que utilizó revisión teórica y el análisis de elementos finitos (FE), el método del estudio incluyó un proceso de deformación induciendo abolladuras en la tubería; la tubería fue sometida a presión interna y estudiado por simulación de elementos finitos (FE) a través de la unidad central de liberación ABAQUS 6.12., el análisis FE comprendía una simulación del elastoplástico en el proceso de abolladuras y la determinación de la distribución de la deformación en la tubería de acero. En todas las simulaciones la tubería tenía una longitud de 2,6 veces el diámetro externo y la relación entre el diámetro exterior y el espesor de la pared fue de 90. La tubería tenía un diámetro externo de 762 mm; 8,5 mm de espesor de pared y 2000 mm de longitud. El estudio permitió evidenciar que generalmente la forma de la curva de esfuerzo-deformación depende de la magnitud de la presión interna. Se pudo observar que la magnitud de la fuerza aumenta linealmente con la profundidad de la abolladura; los esfuerzos máximos de compresión ocurren cerca del centro del punto donde se origina la abolladura. Así mismo, los resultados obtenidos a partir del análisis mostraron que los esfuerzos circunferenciales y longitudinales dependen considerablemente de la presión interna y la profundidad de indentación, en cuanto a la vida útil, esta se ve afectada por la fatiga y el aumento de la presión interna de la tubería<sup>7</sup>.

De igual forma un análisis de elementos finitos también fue desarrollado por Villareal (2007), con el propósito de determinar el riesgo de falla por abolladuras en oleoductos, específicamente en el Oleoducto Nor – Peruano el cual tiene una longitud de 1106 km y diámetros de 16”, 24” y 36”. Las abolladuras analizadas fueron identificadas mediante una inspección ILI, cuya función principal es detectar anomalías geométricas, tales como abolladuras, ovalamientos y arrugas. Los resultados del estudio evidenciaron que aquellas abolladuras que presentaron una elevada probabilidad de falla al ser evaluadas con la norma ASME B 31.4, no requerían reparación.<sup>8</sup>

Las abolladuras en tuberías fueron también analizadas por Blachut et al (2008), a través de una deformación transversal por un indentador rígido. Las abolladuras producidas se

---

<sup>6</sup> McCOY, Jackie. y IRONSIDE, Scott. Dent Management Program. International - Petroleum Technology Institute. International Pipeline Conference, 2004 Volumes 1, 2, and 3.

<sup>7</sup> RAMEZANEI, Maziar. y NEITZERT, Thomas. Strain Based Evaluation of Dents in Pressurized Pipes- World Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering 2013 Vol:7, No:6

<sup>8</sup> VILLAREAL, Walter. Determinación del riesgo de falla por abolladuras en oleoducto usando método de elementos finitos. Piura. Trabajo de grado (ingeniero Mecánico Eléctrico) Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. 2007

evaluaron según la cantidad de distorsión en la sección transversal del tubo y por la propagación de esta distorsión a lo largo de la longitud del tubo. Se realizó el cálculo para diferentes configuraciones de carga y para diferentes indentadores, generando resultados que evidenciaron que la magnitud de la fuerza de dentado aumenta de forma lineal con la profundidad de la abolladura; en una tubería sin presión no hay mucha diferencia en su magnitud para diferentes formas de abolladuras (hemisférica o elíptica); en una tubería presurizada, la magnitud de la fuerza de dentado puede no sólo ser varias veces mayor, pero su valor real se ve fuertemente afectado por la forma del indentador, es decir, si es de perfil alargado o elíptico. Adicionalmente se concluyó respecto a los tubos que la geometría estudiada permite la formación de abolladuras más profundas cuando permanecen libres de presión y que la profundidad de la abolladura puede ser aproximadamente 50% menor, cuando la presión interna se mantiene igual al nivel de diseño. La distorsión permanente de la sección transversal circular de la tubería estudiada se propaga a lo largo de la longitud de la tubería. Según los resultados del estudio para abolladuras generadas por un soporte fijo el área de contacto entre el tubo y el soporte no sólo cambia de forma sino que se desplaza axialmente durante el proceso de dentado. Los datos experimentales selectivos de los tubos a escala de laboratorio confirmaron la validez de los resultados del análisis por elementos finitos pertinentes<sup>9</sup>.

Arrieta et al (1999), desarrollaron un análisis sobre el comportamiento no lineal de la deformación residual obtenida como función de la carga que provoca la abolladura en una tubería para oleoductos, utilizando simulaciones bidimensionales por elementos finitos de este fenómeno, usando ANSYS 5.3 y un modelo elástico lineal. Se consideró una tubería sin esfuerzos residuales, con el objeto de determinar hasta qué punto podría resistir presión interna, los resultados que se evidenciaron al asumir un comportamiento lineal del material y considerar la tubería deformada sin esfuerzos residuales al inicio, produce esfuerzos resultantes al aplicar presión interna, proporcionales al porcentaje de abolladura y que una sección con esfuerzos mayores, se hallaba básicamente sujeta a un esfuerzo promedio más una carga por momento flector. Entonces no sólo el comportamiento no-lineal propio de las cargas de pandeo sino también el correspondiente a la historia de deformación y en particular, los esfuerzos residuales son necesarios.

En general el estudio de Arrieta concluyó que las características de absorción de energía, así como las no linealidades propias de la deformación de una columna por pandeo son indispensables en la simulación computacional de este tipo de eventos, la presencia del suelo y el contenido de la tubería (petróleo), al ser incluidos en el modelo, salvo limitaciones físicas de memoria y tiempo, harán más confiables estos resultados<sup>10</sup>.

---

<sup>9</sup> BLACHUT Jan. Analysis of Pipes Containing Plain and Gouged Dents- An International Journal for Experimental Mechanics. 2008

<sup>10</sup> ARRIETA, Edgardo, PAREDES, Javier y PACHECO Alejandro. Esfuerzos residuales inducidos por abolladuras en tuberías. Rev. Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes.

#### 4. EVALUACIÓN DE ABOLLADURAS SEGÚN API 579-1/ASME FFS-2016.

Actualmente se han llevado a cabo una serie de investigaciones sobre la evaluación de la integridad de las tuberías abolladas, con normas canadienses de diseño de tuberías CSAZ662-03 y su manual auxiliar CSA Z662.1-03, estándar británico BS7910-2005, estándar australiano nacional AS 2885.3-2001, Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos ASME B31.4 y B31.8, todos permiten que la profundidad de la hendidura llegue a <6% del diámetro de la tubería es aceptable. Sin embargo, existen algunas tuberías las cuales a pesar que, la profundidad de la abolladura está por encima del 10% del diámetro puede seguir trabajando en condiciones operacionales específicas, mientras que otras tuberías pueden presentar escape de fluido transportado a pesar que la profundidad de la abolladura sea menor al 3% diámetro de la tubería.

Aunque la profundidad de la abolladura no excede el umbral aceptable, los accidentes de la tubería todavía pueden ocurrir. Por lo tanto, el método de evaluación simplemente basado en la profundidad de la abolladura no puede satisfacer las demandas de la industria de petróleo y gas, es necesario tener en cuenta más parámetros al evaluar la tubería abollada<sup>11</sup>

El API 579 establece que un componente cuando presenta un daño mecánico durante la operación se debe determinar su aptitud para el servicio indicando si puede operar de manera confiable y segura.

Esta norma define unas pautas a seguir para el desarrollo de la evaluación, son las siguientes:

- a) Identificación del defecto o mecanismo de daño.
- b) Alcance y limitación de los procedimientos
- c) Requerimientos sobre los datos necesarios
- d) Técnicas de evaluación y criterios de aceptación.
- e) Calculo de esfuerzo permisible
- f) Diagrama de evaluación de falla
- g) Estimación de vida remanente.

La metodología se puede desarrollar en tres niveles de manera secuencial desde el nivel 1 hasta el nivel 3, conforme a los resultados lo hacen necesario.

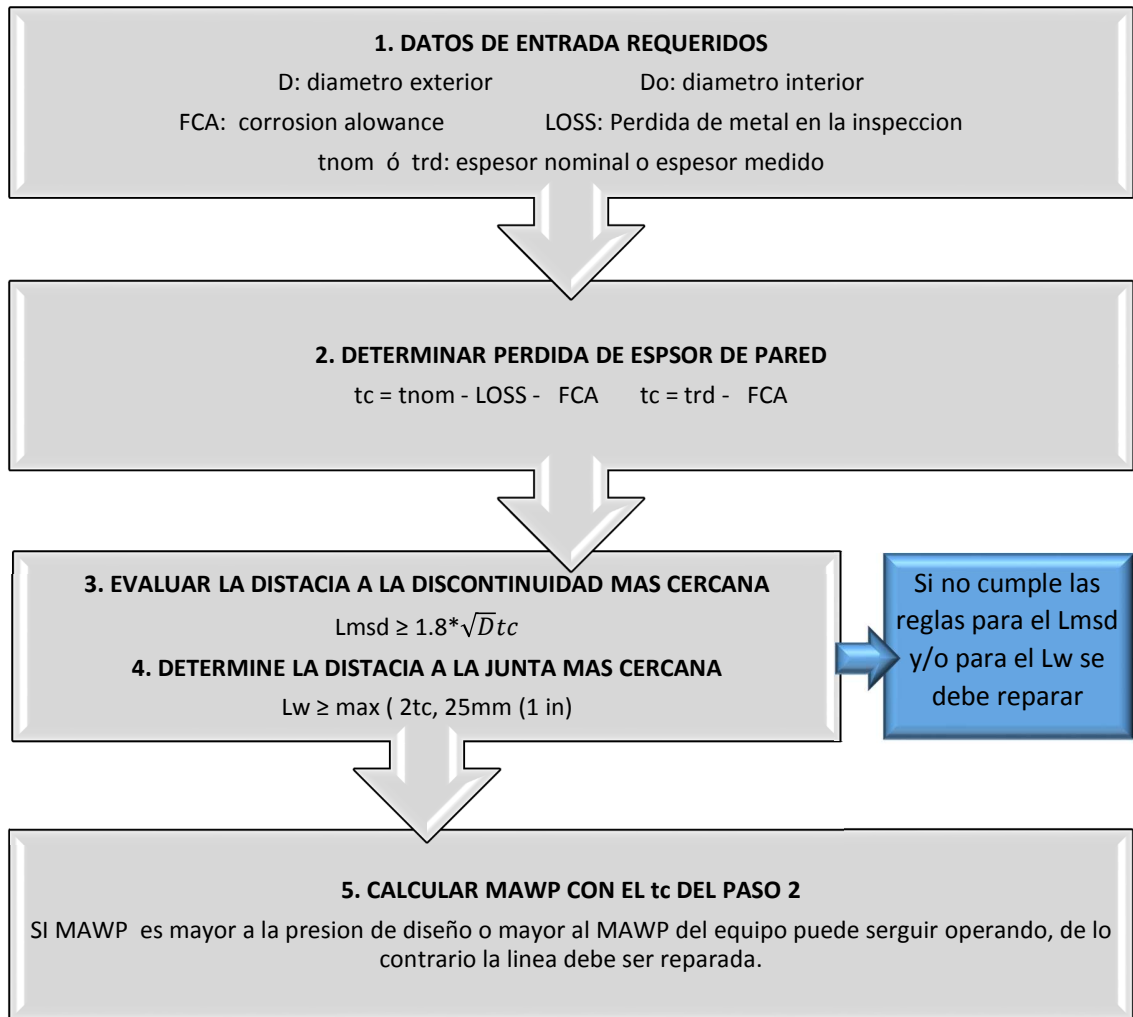
##### 4.1 Análisis Nivel 1

---

<sup>11</sup> WU, Ying y PENG , Zhang - The analysis of damage degree of oil and gas pipeline with type II plain dent. *Engineering Failure Analysis*, *Volume 66*, August 2016, Pages 212–222

La evaluación de nivel 1 se limita a abolladuras en secciones cilíndricas de acero al carbono situadas lejos de las discontinuidades estructurales. El criterio de aceptabilidad se basa en la limitación de la profundidad máxima de la abolladura en el componente a un porcentaje del diámetro exterior del componente

Ilustración 3. Procedimiento para el Análisis de Nivel 1.



#### 4.1.1 Criterio de Aceptación Nivel 1 de FFS

Para aceptación de operación continua se debe cumplir los siguientes requerimientos

- Cumple con todos los parámetros dados en el paso 2
- El MAWP del componente es mayor o igual que la condición de diseño, (PASO 6)

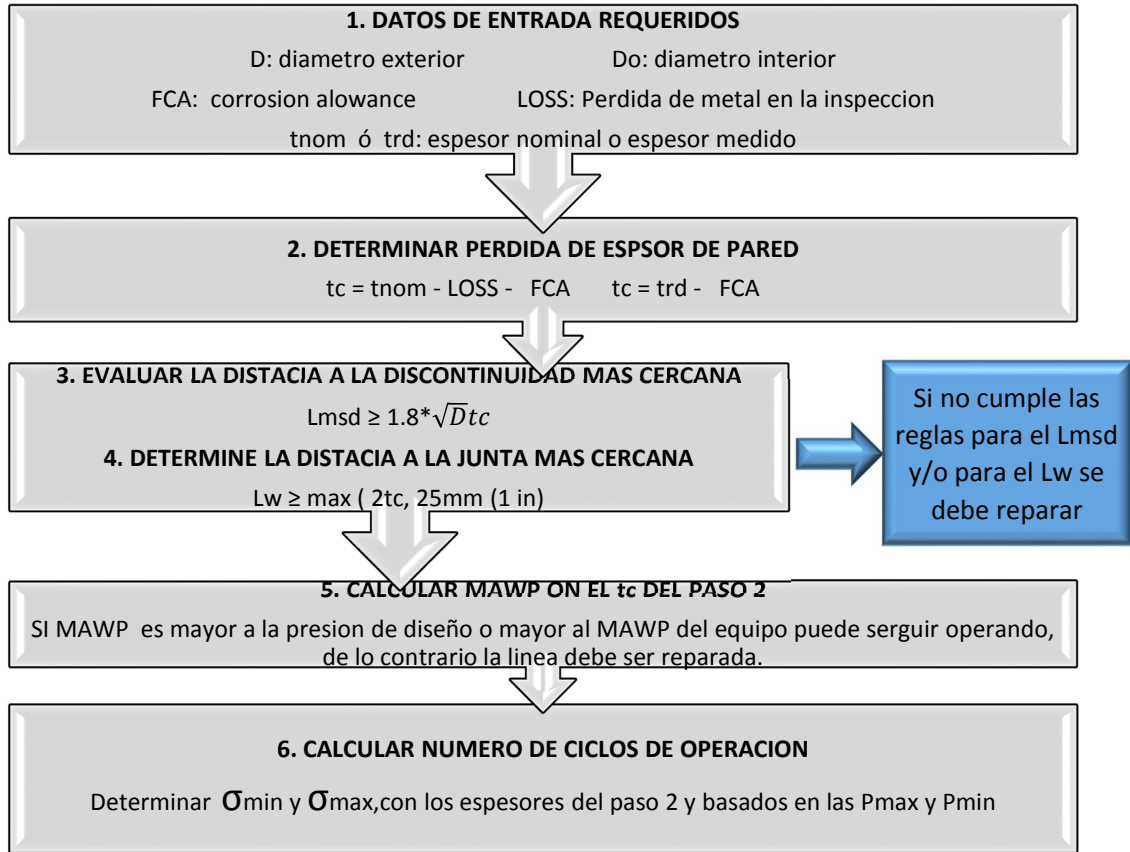
- La profundidad de la abolladura  $d_{do}$  del componente es menor o igual que la máxima profundidad permisible de la abolladura  $d_{dp}$  (PASO 8)
- No existe condición cíclica: Los procedimientos para análisis de FFS nivel 1 son aplicables para sistemas de tubería que no operen en un servicio cíclico, Esto es si el componente está sujeto a menos de 150 ciclos (variaciones de presión y/o temperatura incluyendo cambios operacionales como en las arrancadas y apagadas del sistema en particular). Esto se determina a través de los históricos de operación y futuros planes de condiciones de operación. Si por el contrario se determina que el servicio es cíclico es necesario proceder a nivel 2 de FFS.

Si se cumple con todos los requerimientos entonces el componente es aceptado para operación continua, de lo contrario se debe proceder con Nivel 2 de análisis de FFS.

## **4.2 Análisis Nivel 2**

La evaluación de nivel 2 es similar a la evaluación de nivel 1. Además, se proporciona una evaluación de la fatiga para evaluar los efectos de la carga de presión cíclica, determinando si el componente puede seguir operando

Ilustración 4. Procedimiento para el Análisis de Nivel 2.



$$K_d = 1 + c_s \sqrt{\frac{t_c}{D_o} (d_{do} * C_{ui})^{1.5}} \quad C_s = 2 \text{ para abolladuras lisas } rd \geq 5t_c$$

$$C_s = 1 \text{ para abolladuras agudas } rd \geq 5t_c$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{m,max}^c - \sigma_{m,min}^c}{2}$$

$$\sigma_{\Delta} = \sigma_a \left[ 1 - \left( \frac{\sigma_{m,max} - \sigma_a}{\sigma_{uts}} \right)^2 \right]^{-1}$$

$$N_c = 526,2 \left[ \frac{\sigma_{uts}}{2\sigma_{AKdKg}} \right]^{5,26} \quad K_g = 1$$

### 4.2.1 Criterio De Aceptación Nivel 2 De FFS

Para aceptación de operación continua se debe cumplir los siguientes requerimientos

- Cumple con todos los parámetros dados en el paso 2 del Nivel 1
- El MAWP del componente es mayor o igual que la condición de diseño, (Paso 6 del Nivel 1)
- La profundidad de la abolladura  $d_{do}$  del componente es menor o igual que la máxima profundidad permisible de la abolladura  $d_{dp}$  (Paso 8 del nivel 1)
- El número aceptable de ciclos  $N_c$  calculado en el paso 2 es mayor a o igual que la suma del número de ciclos que ha tenido el sistema históricamente y el futuro anticipado del número de ciclos que se prevén en la operación.

Si se cumple con todos los requerimientos entonces el componente es aceptado para operación continua, de lo contrario se debe proceder con Nivel 3 de análisis de FFS.

### 4.3 Análisis Nivel 3

Las reglas de evaluación de nivel 3 están diseñadas para evaluar abolladuras en geometrías complejas sujetas a condiciones generales de carga. También se requiere una evaluación de este tipo de nivel para materiales distintos del acero al carbono.

Esta evaluación se basa en la geometría, material, cargas, condiciones y rangos de temperatura y presión; donde los modos de falla a evaluar son descritos y analizados en diferentes secciones de la norma:

- ✓ Colapso plástico
- ✓ Falla local
- ✓ Fatiga
- ✓ Daño o fatiga por Creep
- ✓ Contracción por pandeo

El análisis del esfuerzo numérico debe realizarse teniendo en cuenta el material, así como la no linealidad geométrica con el fin de tener en cuenta el efecto de la presión de rigidez en la abolladura y redondeo de la superficie que se produce bajo carga de presión

El análisis de tensiones utilizado en la evaluación debe simular el proceso de deformación que causa el daño para determinar la magnitud de la deformación plástica permanente desarrollada. Para simular el proceso de distorsión, se puede realizar un análisis que incluya la no linealidad geométrica y material así como la interacción de contacto entre la estructura de envoltura original no deformada y el cuerpo de contacto. El componente de contacto puede

ser modelado explícitamente como un cuerpo deformable o como una superficie rígida simple. El análisis debe incluir cargas aplicables para desarrollar la configuración distorsionada final de la estructura del casco, todo esto se analiza a través de software que existen en el mercado los cuales son alimentados por datos levantados en campo y datos constructivos de la línea; para el desarrollo de esta trabajo se realizo la simulación y el modelamiento de uno de los 120 apoyos de la tubería estudiada, los resultados se pueden apreciar en el Anexo B.

## 5. ANÁLISIS DE APTITUD PARA EL SERVICIO DE TUBERÍA DE 36" DE DIÁMETRO EXTERNO CON DEFECTOS TIPO ABOLLADURAS

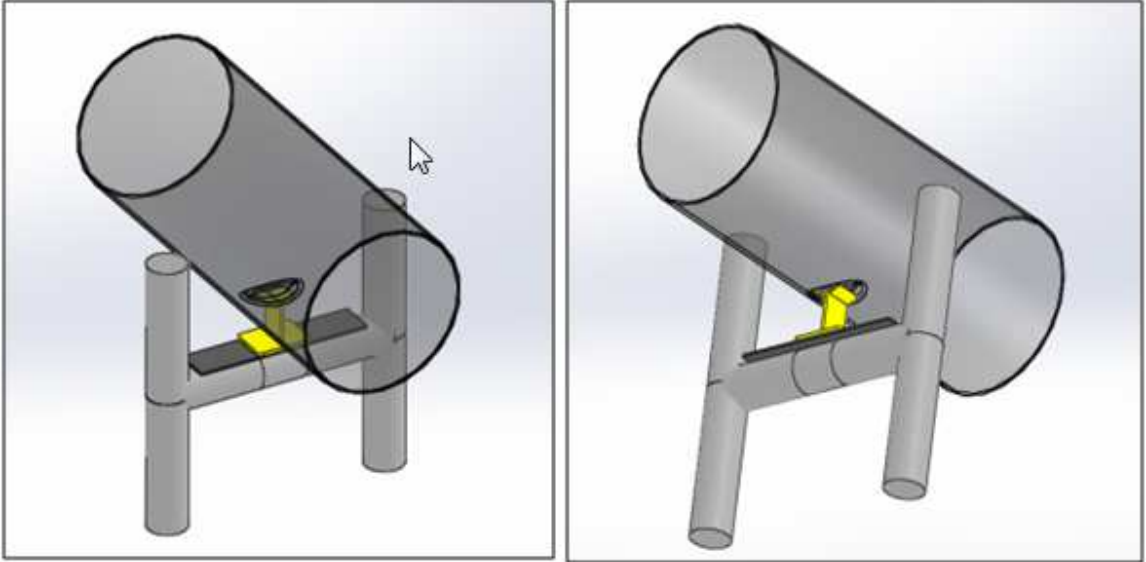
Con el fin de optimizar las prácticas de mantenimiento y operación, mantener la disponibilidad mecánica/operacional y mejorar el rendimiento económico a mediano y largo plazo de sistemas de tubería, se tiene como herramienta de análisis de integridad la metodología de análisis de aptitud para el servicio (API-579-1/ASME FFS-1, Fitness-For-Service) en equipos que contienen defectos o daños identificados, y que aparentemente están cerca o han cumplido su vida útil de diseño.

Tabla 1. Datos generales del componente de tubería.

<b>Ubicación:</b>	Campo ubicado llanos orientales		<b>Sistema:</b>	Agua de inyección	
<b>TAG:</b>	36"OEW-AXAX-100K-153457-N		<b>Línea:</b>	Transporte Batería a Planta Inyección.	
<b>NPS [in]:</b>	36	<b>Schedule:</b>	STD	<b>Material:</b>	API5L Grade B
<b>P. Diseño[psi]:</b>	150	<b>T Diseño [°F]:</b>	200	<b>T. nom [in]:</b>	0.375
<b>SMYS [psi]:</b>	35.000	<b>T. Corr. [in]</b>	0.125	<b>Construcción:</b>	Ene-2013

Se realiza el análisis de valoración de defectos tipo abolladuras presentes en la tubería en referencia en la tabla No.1, la normas empleadas fueron ASM B31.4 (código de diseño) y API 579-1/ASME FFS-2016 (Fitness-For-Service) parte 12 (Assessment of dents, goges, and dent-gouge combination), las abolladuras fueron inducidas en el material debido a la distribución de cargas del sistema sobre los transversales de apoyo de la soportación, es decir los defectos fueron promovidos desde el diseño y se encuentran presentes desde que la tubería fue cargada con el peso muerto: agua de la prueba hidrostática, accesorios, válvulas, recubrimiento y demás componentes del sistema, ver ilustración No.5.

Ilustración 5. Representación de las Abolladuras Generadas por los Apoyos.



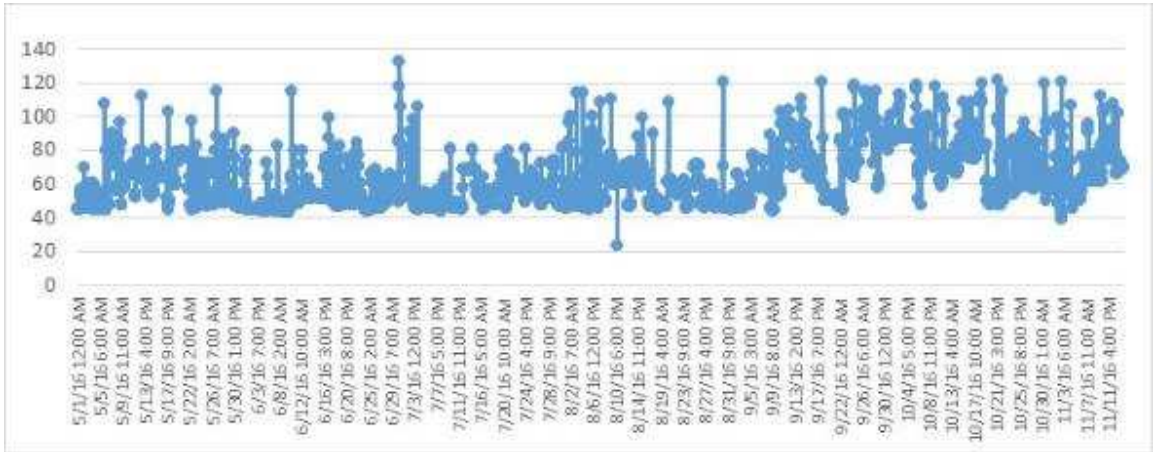
De acuerdo con los datos hora-hora, obtenidos de la operación de la tubería durante 193 días, en el periodo comprendido entre 05 de mayo de 2016 y 14 de noviembre 2016, se obtuvieron los parámetros de operación principales para considerar en el análisis y que se resumen en la tabla No.2 y gráficos No. 5, 6 y 7. No se evidencian valores de presión por encima del calculado por diseño.

Tabla 2. Datos operacionales del componente de tubería.

<b>Variable</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Promedio</b>
Presión [psi]:	24	133	63
Temperatura [°F]:	8	258	141
Flujo [bph]:	190	31.710	22.615

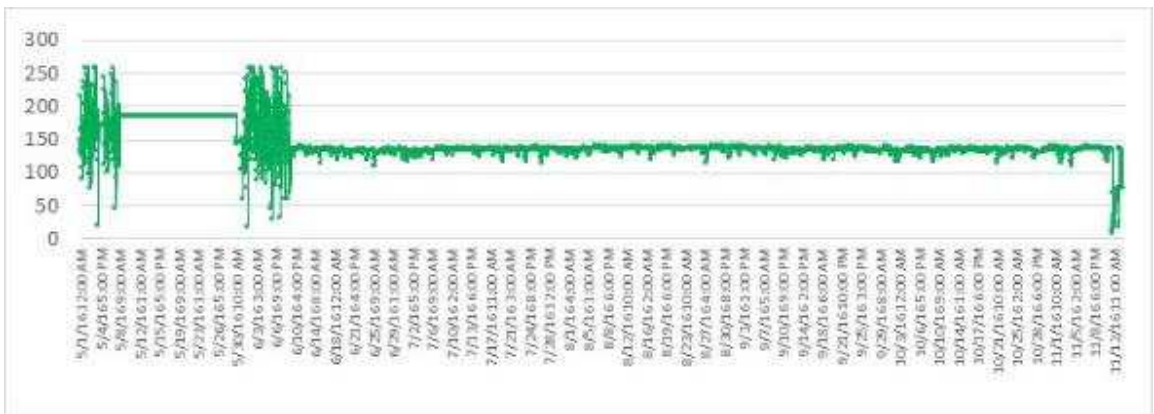
En la ilustración No.6 se evidencia que la tubería está sujeta a cambios de presión diarios debido a disturbios o decisiones operacionales, en el análisis de los datos se establece un cambio de presión promedio de  $\pm 10$ psi durante tres veces por día, esta condición resulta relevante en la evaluación FFS nivel II, sin embargo los ciclos o cambios de presión no se consideran alarmantes, debido a la baja frecuencia y el delta de máximo 10psi.

Ilustración 6. Comportamiento de la Presión del Sistema.



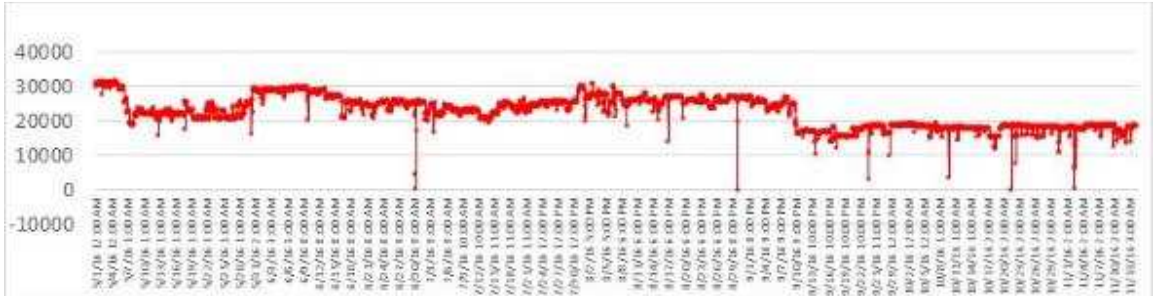
Como se observa en la ilustración No.7 la temperatura del sistema se mantiene constante durante la operación, no se evidencian fluctuaciones significativas en el análisis de esta variable.

Ilustración 7. Comportamiento de la Temperatura del Sistema.



En la ilustración No.8 se observa que el caudal por la tubería de 36in O.D. permanece constante por largos periodos de operación, con un valor promedio de 22.615 Barriles por hora y un valor máximo de 31.170BPH.

Ilustración 8. Comportamiento del Flujo del Sistema.



A partir de la información anterior se estima que el sistema tiene en promedio una variación de presión en  $\pm 10$  psi tres veces al día, y un valor máximo de presión interna de 133psi, la velocidad de flujo calculada para el sistema es de 7ft/seg considerando un flujo promedio de 22.616 BPH.

## 5.1. METODOLOGIA DE EVALUACIÓN

Se realizó el análisis para las 120 anomalías reportadas para el ducto de transferencia de agua de inyección, las abolladuras fueron inspeccionadas visualmente, por líquidos penetrantes y partículas magnéticas, descartando la presencia de entallas, grietas superficiales y corrosión, se efectuó medición del espesor actual de la tubería en la zona afectada y adicionalmente se realizó una caracterización de cada una de las abolladuras.

Ilustración 9. Inspección por Partículas Magnéticas en Abolladuras



Como primera instancia las abolladuras fueron evaluadas por ASME B 31.4 – 451.6.2.4, para lo cual se determinó los siguientes valores, empleando los criterios y ecuaciones del código de la siguiente manera:

$$t = \frac{P_i D}{2S}$$

$$t_n = t + A$$

$$S = F + E \times S_y$$

t: Espesor requerido por presión  
 P<sub>i</sub>: Presión interna de diseño  
 D: Diámetro externo de la tubería  
 A: Tolerancias de fabricación  
 E: Factor de Soldadura  
 S: Esfuerzo permisible del material  
 t<sub>n</sub>: Espesor requerido por presión y tolerancias.

$$t = \frac{150 \times 36}{2 \times 25200} = 0.107in + 0.125in = 0.232in$$

$$P = \frac{2 \times 25200 \times 0.375}{36} = 525psi$$

Nota: el esfuerzo admisible fue calculado según el código de diseño de la tubería ASME B31.4 paragrafo 403.2.1 y para el cálculo de la presión máxima de operación se empleó el espesor original de la tubería.

Como resultado de la aplicación de las fórmulas referenciadas se tiene un MAWP = 525psi y un espesor requerido = 0.232in.

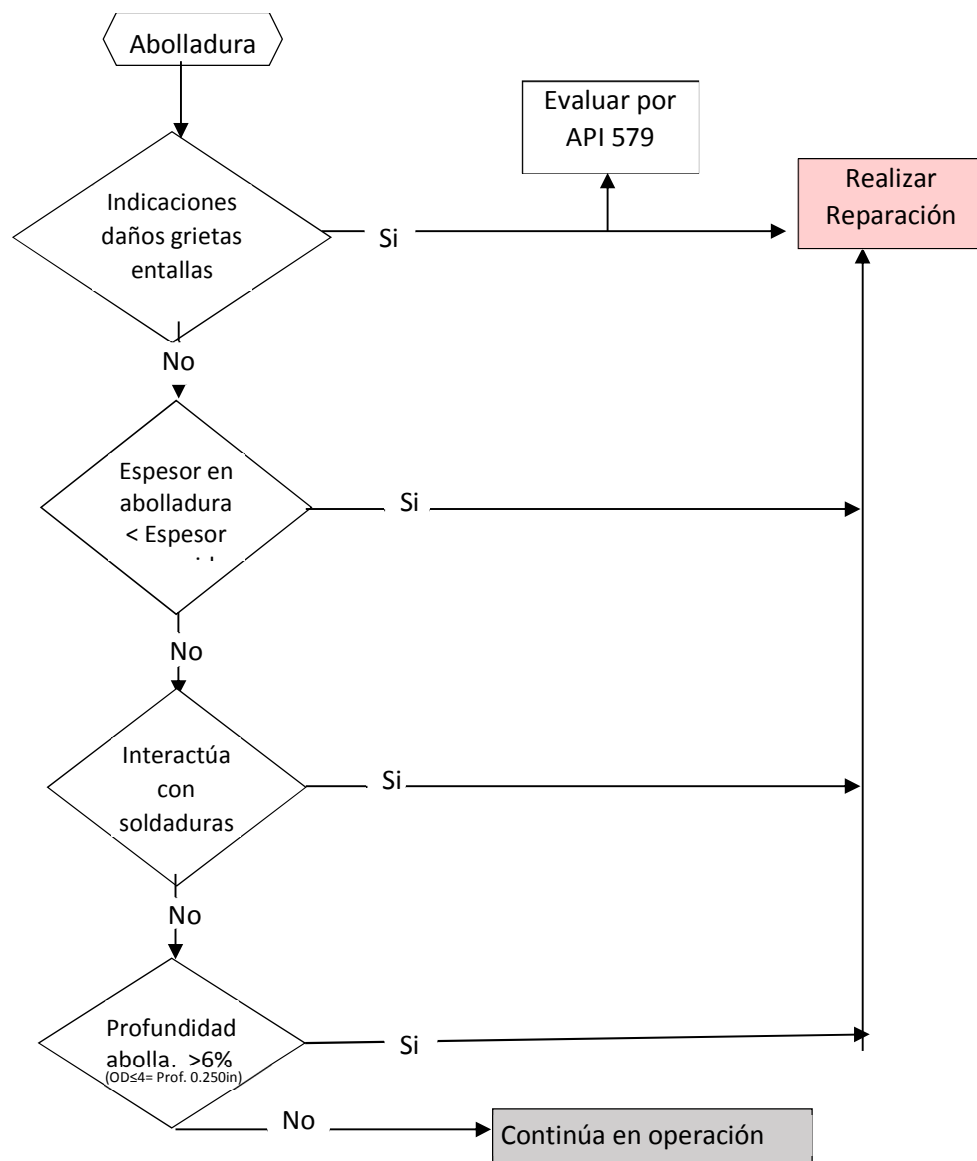
Una vez calculado el porcentaje de reducción de diámetro para cada abolladura, considerando las características de cada defecto y las distancias medidas a las soldaduras, se efectúa la evaluación fundamentada en los criterios de aceptación y rechazo.

### 5.1.1. CRITERIO DE ACEPTACIÓN ASME B31.4

Para aceptación de operación continua se debe cumplir los siguientes requerimientos

- La abolladura no contiene entallas, grietas, ranuras u otros concentradores de esfuerzos.
- La abolladura no presenta una pérdida de metal superior al espesor requerido. La abolladura no afecta la curvatura de la tubería o soldaduras.
- La abolladura tiene una profundidad menor o igual a 6% del diámetro nominal o; 0,250in de profundidad para un diámetro de tubo NPS 4 y menor.

Ilustración 10. Flujoograma Criterio Aceptación ASME B31.4



Como se observa en la ilustración anterior ASME B31.4 tiene unos criterios de rechazo enfocados específicamente en las características físicas del defecto, las indicaciones evaluadas superan estos criterios sin embargo no se consideran parámetros relevantes como presión de trabajo, velocidades de corrosión, esfuerzos entre otros que amenacen la integridad de la tubería, por ello se realizan los siguientes análisis de acuerdo con API 579-1/ASME FFS-2016 parte 12.

## **5.2 VALORACIÓN NIVEL 1 DE ACUERDO CON API-579**

A continuación se detalla el paso a paso para realizar evaluaciones de defectos tipo abolladura según API 579-1/ASME FFS-2016 parte 12, en el anexo A se realiza la evaluación una a una de cada defecto y en plantilla en Excel se podrán evaluar y analizar por separado, incluso servirá para actualizar la evaluación de cada defecto si ocurren cambios en la presión de operación o velocidades de corrosión:

**PASO 1:** Determine los parámetros de entrada:

Es necesario contar con la información de diseño e inspección del equipo o componente al cual va a ser analizado. Se debe disponer de los planos de construcción, especificaciones de diseño y la carpeta de inspección actualizada con los reportes e históricos de mantenimiento. Como mínimo se requiere la siguiente información:

- a. Condiciones de diseño. Presión, Temperatura, Material de construcción, Dimensiones del componente, Corrosión Permisible, Eficiencia de junta, Requerimientos especiales (alivios térmicos, prueba de impacto), Código de Diseño, Formato U1 para recipientes a presión.
- b. Históricos de Inspección: Reportes de inspección completos, que incluyan espesores medidos y resultados de la Inspección Visual y END, así como medición de la profundidad de las abolladuras y en caso de tener entallas caracterizarlas.
- c. Histórico de Operación del equipo: Variables de operación relevantes en el tiempo comparadas con las ventanas de operación y de integridad definidas.

**PASO 2:** Verificar el cumplimiento de las siguientes condiciones

- Diámetro nominal del componente debe estar dentro del siguiente rango  
 $168 \text{ mm (6.625 in)} \leq D \leq 1050 \text{ mm (42 in)}$
- Espesor proyectado del componente debe estar dentro del siguiente rango  
 $5 \text{ mm (0.20 in)} \leq t_c \leq 19 \text{ mm (0.750 in)}$

- El componente debe ser fabricado en acero al carbón con un esfuerzo a la fluencia SMYS y esfuerzo ultimo UTS dado por lo siguiente

$$SMYS \leq 482 \text{ MPa (70000 psi)}$$

$$UTS \leq 711 \text{ MPa (103000 psi)}$$

- Verificar que la indicación tipo abolladura este alejada de la discontinuidad estructural más cercana a una distancia mayor o igual a la dada por  $L_{msd}$

$$L_{msd} \geq 3.6 * \sqrt[2]{D * t_c}$$

Nota: Si adicional a la abolladura hay una entalla el criterio es el siguiente:

$$L_{msd} \geq 1.8 * \sqrt[2]{D * t_c}$$

- Verificar que la indicación tipo abolladura este alejada de la soldadura más cercana a una distancia mayor o igual a  $L_w$

$$L_w \geq \max[2t_c, 25\text{mm (1in)}]$$

NOTA: Si alguno de los parámetros anteriores no se cumple no es posible realizar nivel 1 y por consiguiente debe pasar a nivel 2

PASO 3: Determine la corrosión futura permitida, la cual está dada por la velocidad de corrosión  $C_{rate}$  prevista en el sistema multiplicado por el intervalo de inspección en años

$$FCA = C_{rate} * T$$

Donde;

T: Próximo periodo de inspección en años

PASO 4: Determine el espesor futuro de pared  $t_c$ , el cual está dado por el espesor mínimo medido en el componente menos la FCA

$$t_c = t_{rd} - FCA$$

PASO 5: Calcule el MAWP (Máxima presión permitida de trabajo) de cada componente de acuerdo con el código de construcción del componente, y tomando el valor de espesor futuro de pared  $t_c$  calculado en el paso anterior

PASO 6: Determine si el MAWP calculada del componente es superior a la presión de Diseño  $P_{dis}$  del sistema.

$$MAWP \geq P_{dis}$$

PASO 7: Calcule la máxima profundidad de la abolladura permisible  $d_{dp}$ , la cual es el 7% del diámetro del componente

$$d_{dp} = 0.07 * D$$

PASO 8: Determine si la profundidad de la abolladura  $d_{do}$  en el componente es inferior a la máxima profundidad de la abolladura permisible  $d_{dp}$

$$d_{do} \leq d_{dp}$$

### 5.2.1 CRITERIO DE ACEPTACIÓN NIVEL 1 DE FFS

Para aceptación de operación continua se debe cumplir los siguientes requerimientos

- Cumple con todos los parámetros dados en el PASO 2
- El MAWP del componente es mayor o igual que la condición de diseño, (PASO 6)
- La profundidad de la abolladura  $d_{do}$  del componente es menor o igual que la máxima profundidad permisible de la abolladura  $d_{dp}$  (PASO 8)
- No existe condición cíclica: Los procedimientos para análisis de FFS nivel 1 es aplicable para sistemas de tubería que no operen en un servicio cíclico, Esto es si el componente está sujeto a menos de 150 ciclos (variaciones de presión y/o temperatura incluyendo cambios operacionales como en las arrancadas y apagadas del sistema en particular). Esto se determina a través de los históricos de operación y futuros planes de condiciones de operación. Si por el contrario se determina que el servicio es cíclico es necesario proceder a nivel 2 de FFS.

Si se cumple con todos los requerimientos entonces el componente es aceptado para operación continua, de lo contrario se debe proceder con Nivel 2 de análisis de FFS.

### 5.3 VALORACIÓN NIVEL 2 DE ACUERDO CON API-579

El nivel 2 de FFS para defectos de abolladura solicita los mismos requerimientos de Nivel 1 sin embargo permite la evaluación para sistemas que operan bajo condición cíclica; para esto es necesario calcular el número aceptable de ciclos. Si el número aceptable de ciclos es mayor

a o igual que la suma del número de ciclos que ha tenido el sistema y el futuro anticipado del número de ciclos que se prevén en la operación.

PASO 1: lleve a cabo los pasos de 1 a 8 realizados en el Nivel 1

PASO 2: Determine el número aceptable de ciclos  $N_C$

1. Con base en los históricos de operación, determine la presión mínima  $P_{min}$  y la Presión máxima  $P_{max}$  de la operación del sistema al cual hace parte el componente afectado
2. Determine el esfuerzo circunferencial mínimo  $\sigma_{m,min}^C$  del componente de acuerdo con el código de construcción y tomando la presión mínima  $P_{min}$  del sistema
3. Determine el esfuerzo circunferencial máximo  $\sigma_{m,max}^C$  del componente de acuerdo con el código de construcción y tomando la presión máxima  $P_{max}$  del sistema
4. Determine el factor de fatiga  $C_s$  para evaluación de abolladuras

$$C_s = 2.0 \quad \text{para abolladuras suaves, } r_d \geq 5t_c$$

$$C_s = 1.0 \quad \text{para abolladuras fuertes, } r_d < 5t_c$$

Dónde:

$r_d$  = radio de la base de la abolladura

$t_c$  = Espesor futuro de pared

5. Determine el parámetro de concentración de esfuerzos  $K_d$  asociado a defectos de abolladura

$$K_d = 1 + C_s * \sqrt{\left(\frac{t_c}{D}\right) * (d_{do} * C_{ul})^{1.5}}$$

Dónde,  $C_{ul}$  es un factor de conversión,

$C_{ul} = 1$  si las dimensiones de la abolladura está dada en milímetros

$C_{ul} = 25.4$  si las dimensiones de las abolladura está dada en pulgadas

6. Determine la amplitud de esfuerzos circunferenciales cíclicos de membrana  $\sigma_a$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{m,max}^C - \sigma_{m,min}^C}{2}$$

7. Determine la amplitud ajustada de los esfuerzos circunferenciales cíclicos de membrana  $\sigma_A$

$$\sigma_A = \sigma_a * \left[ 1 - \left( \frac{\sigma_{m,max}^C - \sigma_A}{\sigma_{uts}} \right)^2 \right]^{-1}$$

Donde,

$\sigma_{uts}$  = Esfuerzo ultimo a la tracción del material

8. Determine el numero aceptable de ciclos  $N_c$

$$N_c = 562.2 * \left[ \frac{\sigma_{uts}}{2 * \sigma_A * K_d * K_g} \right]^{5.26}$$

Donde,

$K_g$  = parámetro de concentración de esfuerzos asociado a defectos de entalla Para el caso donde en la abolladura no hay entalla  $K_g = 1$ .

### 5.3.1 CRITERIO DE ACEPTACIÓN NIVEL 2 DE FFS

Para aceptación de operación continua se debe cumplir los siguientes requerimientos

- Cumple con todos los parámetros dados en el paso 2 del Nivel 1
- El MAWP del componente es mayor o igual que la condición de diseño, (Paso 6 del Nivel 1)
- La profundidad de la abolladura  $d_{do}$  del componente es menor o igual que la máxima profundidad permisible de la abolladura  $d_{dp}$  (Paso 8 del nivel 1)
- El número aceptable de ciclos  $N_c$  calculado en el paso 2 es mayor a o igual que la suma del número de ciclos que ha tenido el sistema históricamente y el futuro anticipado del número de ciclos que se prevén en la operación.

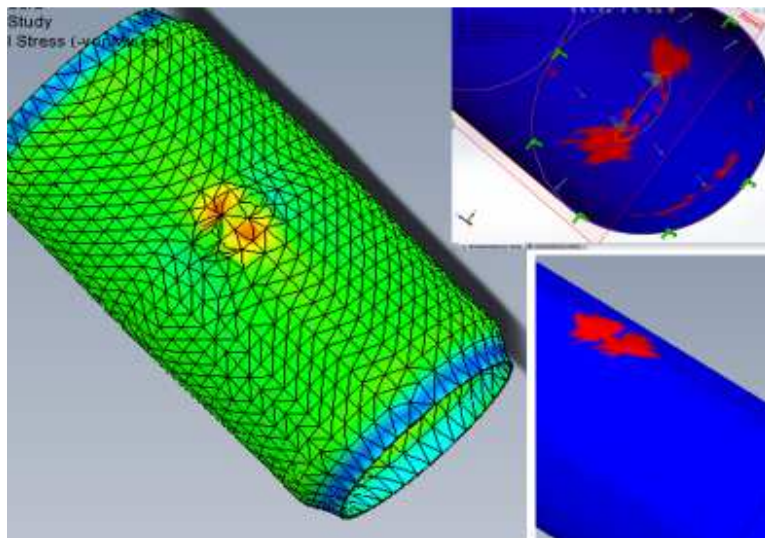
Si se cumple con todos los requerimientos entonces el componente es aceptado para operación continua, de lo contrario se debe proceder con Nivel 3 de análisis de FFS.

#### 5.4 VALORACIÓN NIVEL 3 DE ACUERDO CON API-579

El procedimiento para realizar una evaluación nivel 3 implica considerar características particulares de la tubería y el defecto para ser modelado numéricamente y realizar el análisis de los esfuerzos, se deberá considerar la geometría del defecto, el material de construcción, las cargas a las cuales está sometida la indicación, pérdida de redondez u ovalidad, si la tubería abollada está funcionando en el rango de fluencia modelado máximo esta puede fallar abruptamente, es importante considerar si el defecto tiene inducidos otros tipos de concentradores de esfuerzos que limiten el esfuerzo permisible, como entallas o micro grietas.

Para el modelamiento de las abolladuras objeto del presente documento se empleó el software SOLIDWORDS SIMULATION, introduciendo los valores reales de la tubería y los defectos tipo abolladuras generados en la misma, considerando a su vez que en la inspección realizada no se encontraron indicios de algún tipo de concentrador de esfuerzos adicionales en el defecto. El detalle de la simulación se puede observar en el anexo B.

Ilustración 11. Esfuerzos Residuales en Defectos Tipo Abolladuras 36in OD.



Se demuestra que los esfuerzos generados por las abolladuras se concentran en la zona del pliegue o límites del defecto y no en el fondo de la abolladura, dicha concentración de esfuerzo mínimo de fluencia corresponde al orden de 8.862 psi vs un esfuerzo permisible del

material por diseño de 22.500psi, para lo cual se contaría con un factor de seguridad de 2.9 sin embargo esto evaluado en condiciones de presión constante, pero debido a la condición cíclica de operación se encuentra activo el mecanismo de daño por fatiga mecánica.

## 6. RECOMENDACIONES

Como opción de remediación, se tiene la reparación haciendo cambio de la sección afectada según código de diseño ASME B31.4 empleando soldadores calificados de acuerdo a WPS aprobado para aceros P1, este debe ser ejecutado por soldadores calificados de acuerdo con el código ASME Sec. IX. Si como resultado de la valoración los defectos presentes en la tubería no cumplen con los criterios de aceptación anteriormente descritos.

Debido que la criticidad de las abolladuras aumenta significativamente si el espesor de pared disminuye como consecuencia de la corrosión interna es importante controlar y monitorear las velocidades de corrosión del sistema. Para controlar los fenómenos de corrosión, son a continuación expuestos:

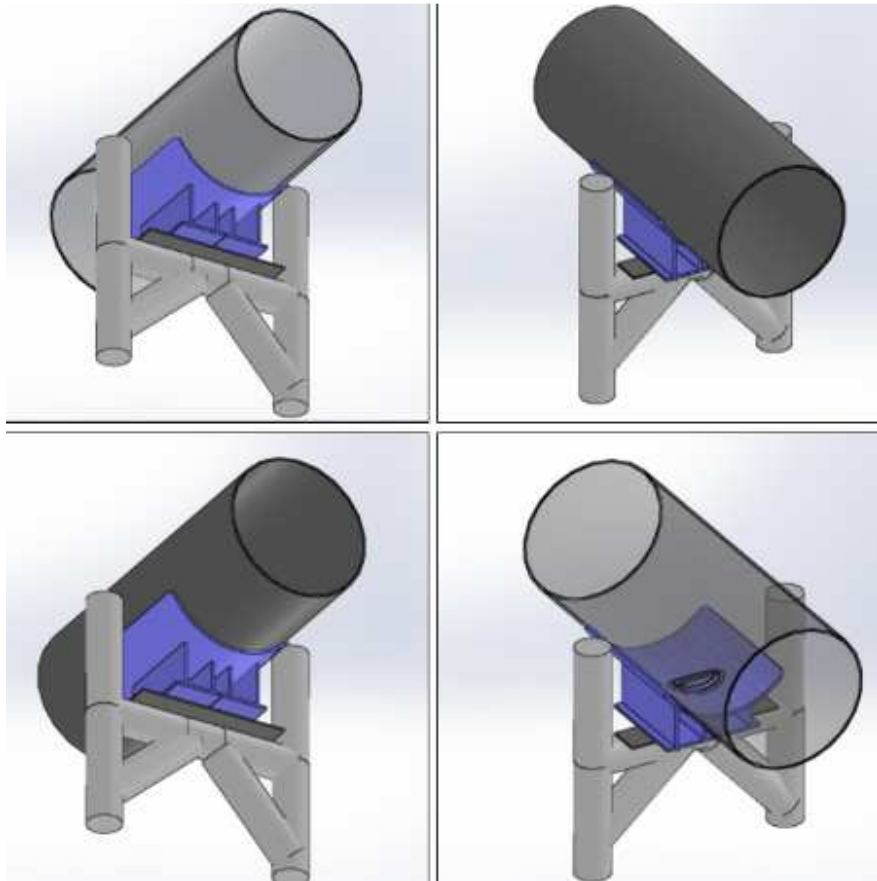
- Realizar cambios físicos en el proceso si es posible, que permitan mantener una operación a condiciones de presión y temperatura constantes, un cambio en el proceso puede minimizar la progresión del daño. Por ejemplo una disminución de presión puede resultar en un espesor mínimo requerido menor por lo tanto se incrementa la vida del componente (re-rateo).
- Incrementar o disminuir la velocidad de la corriente, algunos mecanismos de daño, como erosión, corrosión bajo depósitos, son muy sensitivos a la velocidad en este tipo de servicio, un ligero cambio de aumento o disminución de velocidad del flujo puede cambiar las ratas de corrosión.
- Inyección de químicos como biocidas o secuestrantes de oxígeno, en una base continúa para modificar el ambiente al que está expuesta la superficie metálica de la tubería, Las variables importantes a considerar cuando se inyectan químicos son: Los contaminantes de la corriente, diseño y localización de los puntos de inyección, eventual disposición y reacciones adversas, el efecto en el proceso y efectividad en el monitoreo.
- Limpieza mecánica (marraneo), es un método eficaz para remover líquidos y sólidos corrosivos acumulados en la tubería reduciendo de esta forma altas velocidades de deterioro por corrosión bacteriana o subdepositada, a su vez promueve la formación de una película fílmica pasivante debido al tratamiento químico que sea seleccionado.

Para verificar la efectividad de los controles para evitar altas velocidades de corrosión se deberán monitorear las especies corrosivas presentes en el agua e instalar cupones de corrosión en la salida y llegada del sistema de tuberías.

Por último la instalación de cañuelas tipo silletas sobre la tubería en la ubicación exacta que coincide con los soportes cubriendo las pequeñas deformaciones tipo abolladura, esta cañuela distribuirá y absorberá las cargas debido al peso de la tubería y el fluido transportado, a su

vez aumentara la rigidez de la tubería en la zona afectada debido a las condiciones de cambios de presión, El parche debe ser dimensionado e instalado de acuerdo con los lineamientos de ASME PCC-2. De igual forma se recomienda la instalación de soportes adicionales donde la distancia entre ellos no supere los 12 metros debido a que una mayor distancia supera la deflexión máxima admisible calculada de 1,142 pulgadas para la tubería objeto del análisis de este documento.

Ilustración 12. Diseño propuesto para reparar y prevenir daños por peso muerto en apoyos existentes o futuros.



## 7. CONCLUSIONES

- La Metodología de FFS según API-579 es una herramienta que permite realizar análisis fiables de la condición mecánica de un componente sujeto a presión, el cual tiene un mecanismo de daño identificado, obteniendo como resultado se define si un componente es apto para operación continua o si es necesario un re-rateo, así como la definición de su vida residual con base en la afectación encontrada y su proyección en el futuro. Todo esto ayuda a la toma de decisiones, tales como tiempo de corrida, reparación, estrategias de mantenimiento, plan de inspección, monitoreo y reposición del equipo, etc.
- Debido a que el sistema de tubería está expuesto a corrosión interna, su espesor va adelgazando progresivamente y por lo tanto mayor será la relación  $D/t$  (diámetro externo/espesor de pared) y por consiguiente la tubería será más susceptible a un aumento de tamaño de las abolladuras ya identificadas, así como la aparición de nuevas abolladuras en algunos soportes donde no existían, por lo tanto es necesario contar con un plan de inspección para realizar seguimiento tanto del espesor de la tubería como de las dimensiones de las abolladuras consideradas más críticas, puesto que un aumento en las velocidades de corrosión en estos sitios aumentaría la probabilidad de falla a los defectos identificados.
- Es importante que a nivel de operaciones se lleven a cabo las acciones posibles con el fin de homogenizar la Presión en el sistema, debido a que los cambios cíclicos de presión repercuten en la vida residual de la tubería.
- De acuerdo con el modelamiento se identificó que la zona más susceptible a falla de la abolladura es en el pliegue de la misma, donde los esfuerzos son mayores, por otro lado se observa que la zona de la abolladura presenta una mayor deformación que la tubería, por consiguiente es crítico en condición de operación cíclica a tener falla por fatiga mecánica.
- En todo proceso es importante tener control y monitoreo de la corrosión, puesto que de lo contrario se pueden tener paradas intempestivas por rotura de los componentes de la tubería, lo cual adicionalmente al efecto económico por pérdida de lucro cesante, se puede tener también afectaciones a las personas y al medio ambiente.
- Es importante tener diseños adecuados de tubería, donde se respeten las distancias mínimas entre soportes, así como un diseño adecuado de los mismos que no generen altos esfuerzos sobre los componentes de la tubería.

## BIBLIOGRAFIA

- ALEXANDER, Christopher. Analysis of dented pipeline considering constrained and unconstrained dent configurations. In Energy Sources Technology Conference & Exhibition, Sheraton Astrodome Hotel, Houston, Texas. 1999
- American Society of Mechanical Engineers, Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries. ASME B31.4, Three Park Avenue, New York, NY 10016 USA. 2016.
- American Petroleum institute, Fitness-For-Service. API publishing Services 1220 L Street, N.W, Washintong, D.C 20005. second edition 2016.
- ARRIETA, Edgardo, PAREDES, Javier y PACHECO Alejandro. Esfuerzos residuales inducidos por abolladuras en tuberías. Rev. Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes.
- BLACHUT Jan. Analysis of Pipes Containing Plain and Gouged Dents- An International Journal for Experimental Mechanics. 2008
- COSHAM, Andrew y HOPKINS, Phil. The effect of dents in pipelines—guidance in the pipeline defect assessment manual. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2004 81(2), 127-139.
- CRUZ, Adriana y VANEGAS, Angélica. Inyección de agua. Villavicencio. Trabajo de grado (técnicos en producción de pozos de petróleos y facilidades). Corporación institucional del petróleo Ltda. 2009
- HERNANDEZ, María. y GARCIA, Oscar. Evaluación de defectos en tuberías corroídas por medio del código ASME B31G y la Norma API 579.. Trabajo de grado (ingenieros Metalúrgicos). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Bucaramanga 2010
- McCOY, Jackie. y IRONSIDE, Scott. Dent Management Program. International - Petroleum Technology Institute. International Pipeline Conference, 2004 Volumes 1, 2, and 3.

- RAMEZANEI, Maziar. y NEITZERT, Thomas. Strain Based Evaluation of Dents in Pressurized Pipes- World Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering 2013 Vol: 7, No: 6.
- VILLAREAL, Walter. Determinación del riesgo de falla por abolladuras en oleoducto usando método de elementos finitos. Piura. Trabajo de grado (ingeniero Mecánico Eléctrico) Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. 2007
- WU, Ying y PENG, Zhang - The analysis of damage degree of oil and gas pipeline with type II plain dent. Engineering Failure Analysis, *Volume 66, August 2016, Pages 212–222.*

## **ANEXOS**

Anexos en carpeta adjunta en CD