

**EVALUACIÓN DEL NIVEL 3 DE LA NORMA API RP 579/ASME  
FITNESS FOR SERVICE POR MEDIO DEL SOFTWARE ANSYS PARA UNA  
TUBERÍA PRESURIZADA CON PÉRDIDA GENERAL DE MATERIAL**

**GINNA CAROLINA GÓMEZ ALVIADES  
LAURA LIZETH PÉREZ ECHEVERRY**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES  
BUCARAMANGA  
2015**

**EVALUACIÓN DEL NIVEL 3 DE LA NORMA API RP 579/ASME  
FITNESS FOR SERVICE POR MEDIO DEL SOFTWARE ANSYS PARA UNA  
TUBERÍA PRESURIZADA CON PÉRDIDA GENERAL DE MATERIAL**

**GINNA CAROLINA GÓMEZ ALVIADES  
LAURA LIZETH PÉREZ ECHEVERRY**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Metalúrgico**

**DIRECTOR  
M.Sc IVÁN URIBE PÉREZ  
Ingeniero Metalúrgico**

**CODIRECTOR  
Ph.D OCTAVIO ANDRÉS GONZÁLEZ ESTRADA  
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2015**



## DEDICATORIA

*A mi padre Roger Gómez, quien siempre ha confiado en mí, creyó ciegamente en el logro de este sueño y me brindó todo su apoyo y confianza incondicional en cada una de las cosas que me propuse. A él, por ser el hombre más comprensivo y cariñoso que la vida me pudo haber regalado.*

*A mi madre Amparo, quien fue el mejor ejemplo de entrega incondicional a sus hijas. A ella gracias, ha vivido orgullosa de lo que somos, ha cambiado su felicidad por la nuestra y siempre ha estado ahí haciendo este camino mucho más fácil de conllevar.*

*A mi hermana Natalia, la intensa que me alegra los días, me acompañó y me sacó más de una vez, miles de sonrisas.*

*A ustedes GRACIAS, gracias porque en medio de tantas situaciones se han superado los obstáculos, me han dado el apoyo que no podría haber encontrar en ningún otro lado, y hoy, gracias a eso, alcanzamos este sueño que es de los cuatro.*

*A la memoria de mi nonito Jorge, con quién compartí 21 años de mi vida, quién desde que inicié la escuela estuvo al pendiente, y quien hasta el último día creyó en que cada cosa que hacía era la correcta.*

*A mi prima Marsela, más que una prima mi amiga y quien ha sido como mi hermanita mayor.*

*A Laura por ser una gran compañera de trabajo y quien siempre estuvo comprometida con la causa.*

*Finalmente, a mis amigos, los locos de la universidad, quienes me enseñaron muchas cosas, quienes hicieron mucho más ameno el transcurso de este difícil recorrido y con quienes aprendimos, sufrimos y disfrutamos con la fortuna de encontrarnos en el bello mundo de la universidad.*

*Los quiero*

**Ginna.**

## DEDICATORIA

*Dedicado principalmente a Dios por brindarme la sabiduría, salud, fortaleza y cada una de las herramientas necesarias para culminar este proyecto de grado.*

*A mi familia, en especial a mis padres, Luis Alberto y Jacqueline por ser mi apoyo incondicional durante toda mi carrera profesional, por su amor, enseñanza y porque han hecho de mí, la persona que soy ahora.*

*A mi compañera de proyecto, Ginna Carolina Gómez por caminar juntas durante este proceso a pesar de las dificultades que se nos presentaron día a día, por brindarme su apoyo, sabiduría y amistad.*

*A mis amigos por brindarme su apoyo incondicional, por su compañía en los momentos difíciles, por permitirme disfrutar con ellos momentos de alegrías y por una verdadera amistad.*

*A Charles Caballero por acompañarme desde el inicio de mi carrera, por brindarme su apoyo incondicional, por escucharme y tener las mejores palabras de aliento para mí. Por su paciencia, por llenarme de enseñanzas y por hacer de mí una mejor persona.*

*Y en general a cada una de aquellas personas que de una u otra forma aportaron un granito de arena para culminar esta meta, por su apoyo, conocimiento y amistad.*

*Gracias*

*Laura Lizeth Pérez*

## AGRADECIMIENTOS

*A nuestro director el profesor Iván Uribe Pérez quien confió en nosotras para desarrollar este proyecto, y que con su acompañamiento y paciencia hizo posible culminar esta meta propuesta.*

*A nuestro codirector el profesor Octavio Andrés González quien con sus conocimientos y comprensión nos guió en el desarrollo de este proyecto complementando áreas ajenas hasta ahora en nuestra escuela.*

*Finalmente, a la escuela de Ingeniería Metalúrgica por ser la base de nuestro conocimiento y brindarnos todas las herramientas necesarias para hoy alcanzar la meta de ser Ingenieras Metalúrgicas.*

# CONTENIDO

Pág.

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>18</b>
<b>1. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>20</b>
1.1 CORROSIÓN EN LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO .....	20
1.2 NORMA API-579/ASME FITNESS-FOR-SERVICE.....	21
1.2.1 Procedimiento de evaluación de diferentes mecanismos de daño.. .....	22
1.2.1.1 Pérdida general de metal – Sección 4. ....	24
1.3 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN .....	26
1.4 NIVELES DE EVALUACIÓN .....	27
1.5 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF) .....	29
1.5.1 ANSYS®.....	31
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>34</b>
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	34
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	34
<b>3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>35</b>
3.1 OBTENCIÓN DE DATOS .....	35
3.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA TUBERÍA .....	37
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>40</b>
4.1 EVALUACIÓN DE LA TUBERÍA CON BASE EN LA SECCIÓN 4 DE LA NORMA API RP 579.....	41
4.2 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN NIVEL 1 .....	48
4.3 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN NIVEL 2 .....	50
4.3.1 Máxima presión de operación admisible .....	51

4.4 NIVEL 3 DE EVALUACIÓN .....	52
4.5 MODELO DE SIMULACIÓN NUMÉRICA PARA LA EVALUACIÓN DEL NIVEL 3 CON EL USO DEL SOFTWARE ANSYS.....	53
4.5.1 Pre-proceso. ....	54
4.5.2 Cálculo con elementos finitos.....	55
4.5.3 Post-proceso.....	57
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>69</b>
<b>6. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>72</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>73</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>74</b>

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Esquema para el procedimiento de evaluación de la pérdida general de metal. ....	25
<b>Figura 2.</b> Esquema de la metodología. ....	35
<b>Figura 3.</b> Segmentos que componen la tubería. ....	36
<b>Figura 4.</b> Distribución general del mallado para la inspección por ultrasonido. ....	37
<b>Figura 5.</b> CTP longitudinal generado por las lecturas de espesor para la tubería en estudio. * .....	45
<b>Figura 6.</b> CTP circunferencial generado por las lecturas de espesor para la tubería en estudio.* .....	47
<b>Figura 7.</b> Modelo virtual de la tubería generada en Solidworks. ....	53
<b>Figura 8.</b> Mallado utilizado en la simulación de la tubería. (a) Malla automática generada por el simulador. (b) Malla final refinada obtenida en la última iteración. ....	54
<b>Figura 9.</b> Condiciones estructurales iniciales. (a) Presión interna. (b) Presión longitudinal. (c) Desplazamiento con restricción longitudinal. (d) Gravedad. ....	56
<b>Figura 10.</b> Mallado y resultados de la tubería sin defecto. (a) Distribución de la malla. (b) Esfuerzo equivalente de Von - Mises. (c) Factor de seguridad. ....	58
<b>Figura 11.</b> Esfuerzo equivalente de Von - Mises con una presión de 8,34 MPa. ...	59
<b>Figura 12.</b> Factor de seguridad con una presión de 8,34 MPa. ....	61
<b>Figura 13.</b> Esfuerzo equivalente de Von - Mises con una presión de 5,45 MPa. ...	62
<b>Figura 14.</b> Factor de seguridad con una presión de 5,45 MPa. ....	64
<b>Figura 15.</b> Convergencia del esfuerzo equivalente para una presión de operación de 8,34 MPa en la tubería con defecto. ....	65
<b>Figura 16.</b> Convergencia del esfuerzo equivalente para una presión de operación de 5,45 MPa en la tubería con defecto. ....	66

<b>Figura 17.</b> Convergencia del esfuerzo equivalente para la tubería sin defecto. ....	67
<b>Figura 18.</b> Esfuerzo circunferencial de la tubería sin defecto.....	77
<b>Figura 19.</b> Esfuerzo radial de la tubería sin defecto. ....	78
<b>Figura 20.</b> Esfuerzo longitudinal de la tubería sin defecto.....	79
<b>Figura 21.</b> Esfuerzo equivalente de Von - Mises de la tubería sin defecto.....	80
<b>Figura 22.</b> Factor de seguridad de la tubería sin defecto. ....	80

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Generalidades de los procedimientos de evaluación de fallas y daños...23	
<b>Tabla 2.</b> Composición química del acero API 5L X52 (% en peso). .....38	
<b>Tabla 3.</b> Propiedades mecánicas del acero API 5L X52.....38	
<b>Tabla 4.</b> Condiciones de diseño de la tubería en estudio. ....39	
<b>Tabla 5.</b> Nomenclatura utilizada en los niveles 1 y 2 de evaluación.....40	
<b>Tabla 6.</b> Datos obtenidos por la convergencia con una presión de 8,34 MPa. ....65	
<b>Tabla 7.</b> Datos obtenidos por la convergencia con una presión de 5,45 MPa. ....66	
<b>Tabla 8.</b> Datos obtenidos por la convergencia en la tubería sin defecto. ....67	

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
<b>Anexo A.</b> Lecturas de espesor tomadas por la técnica de ultrasonido.....	74
<b>Anexo B.</b> Selección del espesor mínimo medido en cada dirección.....	75
<b>Anexo C.</b> Comparación de cálculos teóricos y simulados de esfuerzos y factor de seguridad presentes en la tubería sana.....	77

## RESUMEN

**TÍTULO: EVALUACIÓN DEL NIVEL 3 DE LA NORMA API RP 579/ASME FITNESS FOR SERVICE POR MEDIO DEL SOFTWARE ANSYS PARA UNA TUBERÍA PRESURIZADA CON PÉRDIDA GENERAL DE MATERIAL.\***

**AUTORES:** Gómez Alviades GINNA CAROLINA; Pérez Echeverry LAURA LIZETH \*\*

**PALABRAS CLAVES:** API RP579, Mecanismos de daño, Niveles de evaluación, Presión máxima de operación admisible, Elementos finitos.

### DESCRIPCIÓN:

La norma API RP 579 ASME FITNESS FOR SERVICE es una herramienta que ofrece procedimientos de evaluación para equipos de la industria que presentan algún tipo de defectos o que llevan cierto tiempo en servicio. Este proyecto cuenta con la evaluación de un tramo de gasoducto que presenta pérdida de material debido a la corrosión interna, teniendo en cuenta la sección 4 de la norma API RP 579 ASME FITNESS FOR SERVICE que abarca pérdida general de metal. Esta evaluación busca obtener una respuesta concreta a cerca de la posibilidad de que el gasoducto continúe o no en operación aún con los defectos presentes, teniendo como herramienta principal de evaluación el nivel 3 de la sección 4 de la norma, basándose en el método de los elementos finitos bajo el uso del software de simulación ANSYS.

Los resultados obtenidos indicaron que el tramo de gasoducto analizado no es apto para continuar en operación ya que la simulación arrojó valores de esfuerzos máximos que exceden el límite del esfuerzo admisible para operar de forma segura, y a su vez un factor de seguridad por debajo del aceptado para este tipo de componentes.

Como opción para continuar en operación con los defectos presentes, se calculó una nueva Presión Máxima de Operación Admisible MAWPr la cual fue útil como medida para reducir los esfuerzos que se están presentando en la tubería y aumentar el factor de seguridad en el tramo de gasoducto analizado.

---

\*Proyecto de Grado.

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Director: MsC Iván Uribe Pérez, Ingeniero Metalúrgico. Co-director PhD Andrés Gonzáles Estrada, Ingeniero Mecánico.

## ABSTRACT

**TÍTULO: LEVEL 3 ASSESSMENT OF THE API STANDARD RP 579 ASME FITNESS FOR SERVICE USING THE ANSYS SOFTWARE FOR A PRESURIZED PIPELINE WITH GENERAL METAL LOSS\***

**AUTHORS:** Gómez Alviades GINNA CAROLINA; Pérez Echeverry LAURA LIZETH \*\*

**KEYWORDS:** API RP 579, Damage mechanisms, Levels Evaluation, Maximum Allowable Operating Pressure, Finite Element.

### DESCRIPTION:

The API standard RP 579/ASME FITNESS FOR SERVICE is a tool that provides assessment procedures for industry equipments that have some type of defect or bearing long time in service. This project contains an evaluation of a stretch of pipeline that presents material loss due to internal corrosion, considering section 4 of the standard API RP 579/ASME FITNESS FOR SERVICE which establishes the general metal loss. This evaluation seeks a concrete answer about the possibility that the pipeline continue or not in service even with the present defects, using level 3 of section 4 of the standard as main tool, based on the finite element method with the use of simulation software ANSYS.

The results obtained indicated that the stretch of pipeline analyzed is unfit to continue in operation, since the simulation showed maximum efforts values that exceed the limit of permissible effort to operate safely and a safety factor below the accepted for this kind of components.

As an option to continue in operation with the present defects, a new maximum allowable operating pressure was calculated MAWPr, it was useful as measure to reduce the stresses that are occurring in the pipeline, and increase the safety factor on the stretch of pipeline analyzed.

---

\*Bachelor Thesis

\*\*Faculty of Physical-Chemistry Engineering School of Metallurgical Engineering and Materials Science.  
Director: MSc. Iván Uribe Pérez, Metallurgical Engineer. Co-director: PhD Octavio Andrés González Estrada, Mechanical Engineer.

## INTRODUCCIÓN

Los equipos de plantas de proceso a menudo son expuestos a ambientes corrosivos y/o temperaturas elevadas, condiciones bajo las cuales, el material usado en el equipo se puede degradar con el tiempo de servicio. Los procedimientos de evaluación por la norma API RP 579/ASME Fitness For Service (Aptitud para el servicio) proporcionan un medio para ayudar a los operadores de las plantas de proceso a tomar decisiones para determinar si un equipo puede continuar operando con seguridad para evitar ante todo lesiones al personal, al medio ambiente y paros inesperados.

Los puntos principales a tomar después de la evaluación son: la decisión de operar, modificar las condiciones operativas, reparar, monitorear o reemplazar el equipo, además de definir, según sea el caso, una nueva frecuencia de los equipos. La metodología de Fitness For Service utiliza métodos analíticos para evaluar los defectos o daños. Estos métodos son basados en análisis de esfuerzos, pero también requieren información sobre la operación de los equipos, propiedades del material de fabricación y pruebas no destructivas. <sup>1</sup>

Para los equipos a presión en las plantas de operación, la norma API RP 579/ASME Fitness For Service establece tres niveles de evaluación de la integridad estructural. Estos niveles son cada vez más sofisticados, cada nivel de revisión proporciona un

---

<sup>1</sup> PEREZ, M., LARA, A., GARCIA, H. Aplicación de la Metodología de Fitness For Service a un Separador de Descarga de Gas Acido. Cancún, México, 2011, p. 1-2

equilibrio entre el grado de conservatismo, la cantidad de información requerida, la habilidad del operador y la complejidad del análisis. <sup>2</sup>

Como caso de estudio en el presente trabajo se eligió un tramo de gasoducto que está en operación desde hace 8 años. Para conocer el estado actual se tomaron lecturas de espesor del tramo de la tubería y se determinaron las condiciones en las que se encuentra debido a la pérdida de material ocasionada por la corrosión. El objeto de este estudio es determinar la viabilidad de continuar en operación o no, aún con los defectos de corrosión que se están presentando. El comportamiento del gasoducto se estudia con un modelo basado en la pérdida general de material y los esfuerzos críticos que se concentran en las zonas afectadas. Este modelo permite calcular el esfuerzo de fluencia y la tensión que presenta el gasoducto teniendo en cuenta los procedimientos establecidos en la norma API RP 579/ASME Fitness For Service. Dicha norma proporciona evaluaciones cuantitativas de ingeniería, que se realizan para demostrar la integridad estructural de un componente en servicio que contiene un daño o defecto.

Esta evaluación se llevó a cabo utilizando los resultados arrojados por el nivel 3 de evaluación, el cual requiere un análisis completo mediante técnicas computacionales avanzadas, tales como el análisis por elementos finitos. La simulación numérica se puede llevar a cabo con ANSYS®, que es un software de ingeniería desarrollado bajo la teoría de elementos finitos para estructuras. Dicho software es utilizado como herramienta base para el análisis del gasoducto en estudio, debido a que aporta claridad para la solución de los problemas de diseño más complejos a través de una simulación rápida, exacta y confiable.

---

<sup>2</sup> ALMEIDA, J., RODRIGUES, M., DA SILVA, R. modelagem e solução transiente-térmica numérica da integridade estrutural de um vaso de pressão cilíndrico com corrosão usando fitness-for-service. Brasil, 2014.

## **1. MARCO TEÓRICO**

### **1.1 CORROSIÓN EN LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO**

Hoy en día, las principales fuentes de energía son los hidrocarburos: petróleo crudo y gas natural, que están contenidos en los espacios porosos de las peñas en la profundidad de la tierra. Para extraerlo, producirlo, refinarlo y transportarlo, se requiere del uso de herramientas tales como las tuberías, elementos que facilitan el proceso ya que son el medio de transporte más eficiente para tal actividad. Sin embargo, hay muchos factores que pueden causar problemas y uno de los más graves de ellos es la corrosión.

La corrosión es la razón principal para el envejecimiento y el deterioro de las tuberías. Se dice que la mayoría de los costos de reemplazo están relacionados con la corrosión y a pesar de que hay diversos tipos de protección, es inevitable. Puede aparecer en diferentes formas, tales como la corrosión general con la pérdida uniforme del espesor de pared, o la corrosión por picadura, que corresponde a la reducción del espesor de la pared local. Esto lleva a un deterioro de la tubería y pone en peligro la producción, instalaciones e incluso la vida humana. Para evitar fallas y garantizar la seguridad de operación, la corrosión tiene que ser detectada, medida y se debe determinar la resistencia restante del área corroída.

Con el fin de optimizar la frecuencia de inspección y mantenimiento en el crecimiento de la corrosión, es aconsejable establecer modelos de predicción de la vida remanente de la tubería. Esto, entre otras cosas, significa que en la etapa de inspección la decisión rentable tiene que ser hecha sobre la base de los defectos de corrosión medidos y evaluados.

Hay muchas maneras de detección de corrosión como por ejemplo, los métodos mecánicos, métodos eléctricos, métodos acústicos. Sin embargo, no es suficiente detectar y luego evaluar el área corroída. También es necesario predecir el deterioro del defecto y calcular la resistencia de la pared de la tubería en el momento de la siguiente inspección planificada. Esta predicción se basa en las normas técnicas, que tienen en cuenta no sólo las propiedades del material, sino también propiedades del petróleo, el gas y el medio ambiente circundante. Las normas difieren entre países, regiones o incluso empresas.<sup>3</sup>

La norma API 579/ASME Fitness For Service tiene por objeto complementar y aumentar los requisitos de la norma API 510 “*Código de Inspección de Recipiente a Presión*”, API 570 “*Código de Inspección de Tuberías*”, y API 653 “*Inspección, Reparación, Alteración y Reconstrucción de tanques*”, para garantizar la seguridad de la operación, mientras que los equipos más antiguos continúan operando, proporcionando así procedimientos técnicamente sólidos de evaluación Fitness For Service para asegurar que los diferentes proveedores de servicios realicen predicciones de vida restantes coherentes y para ayudar a optimizar el mantenimiento y operación de las instalaciones existentes, con el fin de mantener la disponibilidad de las plantas más antiguas y mejorar la viabilidad económica a largo plazo.<sup>4</sup>

## **1.2 NORMA API-579/ASME FITNESS-FOR-SERVICE**

La evaluación de Aptitud para el Servicio (FFS) es un enfoque multidisciplinario que tiene como propósito determinar, como su nombre lo indica, si el equipo es apto para continuar en servicio. El equipo o sistema en cuestión puede contener defectos

---

<sup>3</sup> SZARY, T. The Finite Element Method Analysis for Assessing the Remaining Strength of Corroded Oil Field Casing and Tubing. Technischen Universität Bergakademie Freiberg, 2006. p 1, 10.

<sup>4</sup> ANDERSONA, T., OSAGE, D. API 579: a comprehensive fitness-for-service guide. USA, 2000.

u otros tipos de daños, o puede ser sometido a condiciones más severas de funcionamiento que lo previsto por el diseño original.

La norma de FFS para los equipos a presión (recipientes a presión, tanques de almacenamiento y tuberías), ha sido publicada por el American Petroleum Institute (API) y la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME). La versión original de este método, API 579, fue publicada en el 2000 por la API. Ambas organizaciones colaboraron en la creación de la edición revisada, API 579-1/ASME FFS-1, que fue publicado en 2007. El documento original API 579 se refería principalmente a equipos de refinería, aunque el procedimiento se utiliza ampliamente fuera de la industria del petróleo. Con la adición de la ASME, nombre de marca en la nueva versión, hay un reconocimiento explícito de que esta norma es adecuada para una amplia gama de industrias que utilizan equipos a presión, incluida la de generación eléctrica, química, tuberías, pulpa y papel. El contenido de la norma ha sido actualizado para reflejar los avances tecnológicos y la más amplia cobertura de la industria.<sup>5</sup>

La norma API 579-1/ASME FFS-1, puede utilizarse para evaluar si es o no seguro operar un equipo que puede haberse degradado en servicio, característica principal que influyó en la elección de la norma como base para la evaluación del gasoducto en estudio.

**1.2.1 Procedimiento de evaluación de diferentes mecanismos de daño.** Los procedimientos de evaluación de FFS en esta norma están organizados por tipo de falla y mecanismos de daño. En la tabla 1 aparece una lista de tipos de falla y

---

<sup>5</sup> DELGADO, L., RUEDA, L., Tesis de grado: Desarrollo de una herramienta computacional para el análisis y evaluación de defectos de manera sistematizada, basados en la norma API RP 579 fitness for service. Universidad Industrial de Santander, 2013, p 17

mecanismos de daño y la sección correspondiente que proporciona la metodología FFS. <sup>6</sup>

**Tabla 1.** Generalidades de los procedimientos de evaluación de fallas y mecanismos de daños.

MECANISMO DE DAÑO	SECCIÓN
Fractura por fragilidad	3
Pérdida General de Metal	4
Pérdida Local de Metal	5
Picadura por Corrosión	6
Ampollamiento y daños por hidrógeno asociados con HIC y SOHIC	7
Mala alineación de la soldadura y distorsiones del recubrimiento	8
Fallas en forma de grietas	9
Daños por creep	10
Daño por fuego	11
Daños por abolladuras y entallas	12
Daños por laminaciones	13

En el presente trabajo se analiza un gasoducto con corrosión general, lo que corresponde a seguir el procedimiento de la sección 4 (pérdida general de metal) de la norma API RP 579/ASME Fitness For Service, para determinar si la tubería tiene posibilidad de seguir operando o si se puede implementar métodos correctivos.

<sup>6</sup> AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE AND AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Fitness For Service. Segunda edición. API, 2007, API 579-1/ASME FFS-1. p. 30

**1.2.1.1 Pérdida general de metal – Sección 4.** Es aquella corrosión que se produce con el adelgazamiento uniforme producto de la pérdida regular del metal superficial. En las tuberías presurizadas es muy frecuente este defecto, por lo que la sección cuatro de la norma API RP 579/ASME contiene el procedimiento y la forma de evaluarlo.

Los procedimientos de esta sección están basados en una aproximación de promedio de espesores que ofrece un resultado adecuado cuando se aplica a la pérdida uniforme de metal. Si se encuentran áreas locales de pérdida de metal en el componente, el promedio de espesores puede producir resultados conservadores. Para estos casos, se pueden utilizar los procedimientos de evaluación de la sección 5 (Evaluación Pérdida local de metal), que requiere del uso de perfiles de grosor detallados para reducir lo conservador del análisis.

Algunas de las generalidades de esta sección son:

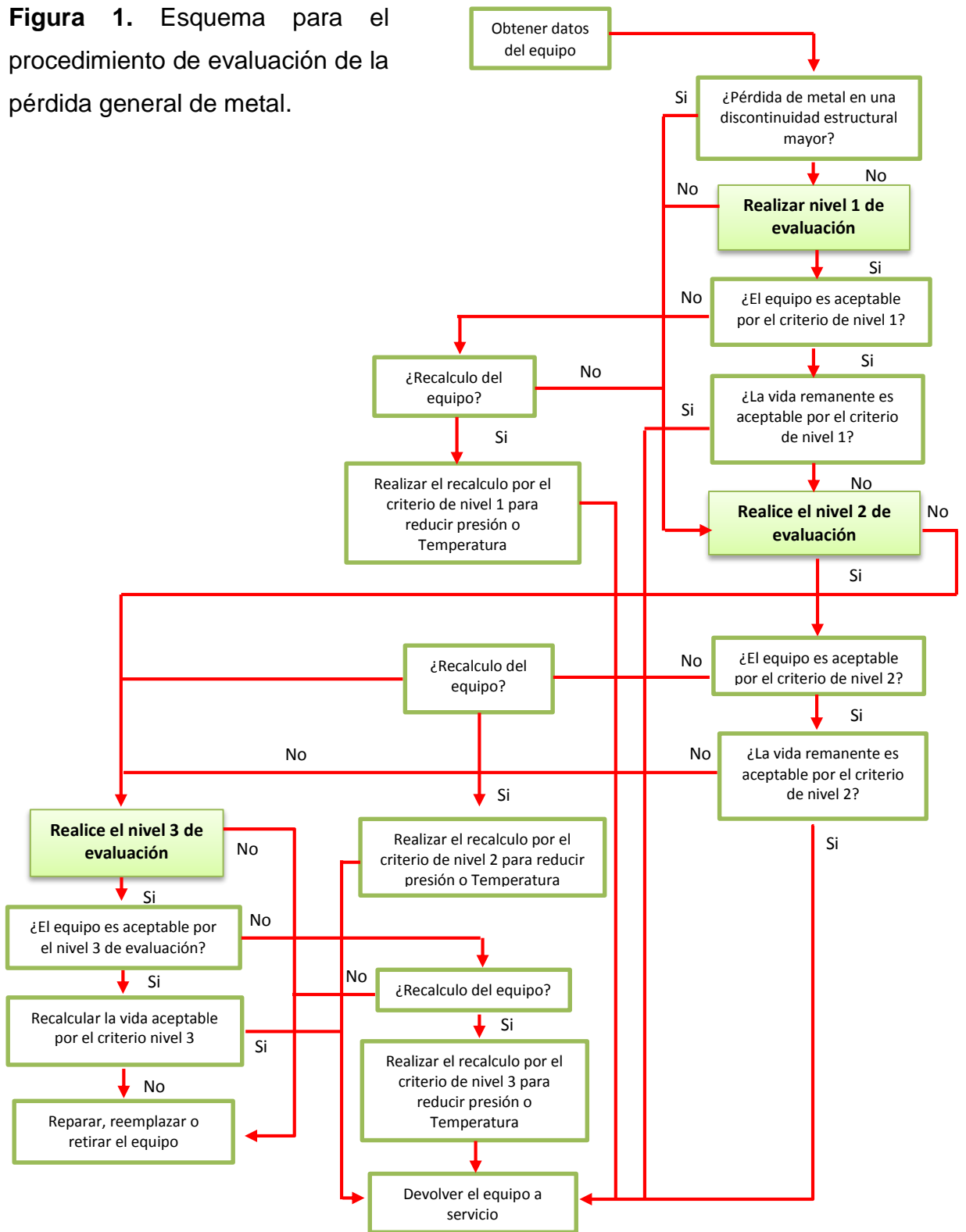
- El procedimiento FFS se emplea para evaluar componentes presurizados que hayan sufrido pérdida de espesor, ya sea por corrosión y/o erosión.
- El concepto de la evaluación radica en aproximaciones de un espesor promedio.
- Las evaluaciones en esta sección están basadas en la toma de medidas de espesor del componente, que pueden realizarse ya sea mediante una toma de espesor por puntos o mediante perfiles de espesor en direcciones meridional y circunferencial o según corresponda.<sup>7</sup>

En figura 1 se detalla un esquema con el procedimiento requerido para evaluar un componente con pérdida general de metal.

---

<sup>7</sup> Ibid., p. 88

**Figura 1.** Esquema para el procedimiento de evaluación de la pérdida general de metal.



**Fuente:** Adaptación y traducción de la norma API RP 579/ASME Sección 4, Figura 4.1, p. 4-22.

### 1.3 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

Cada una de las metodologías de evaluación FFS presentadas en la norma, utiliza alguno de los siguientes criterios de aceptación:

- **Esfuerzo Permisible.** Este criterio de aceptación se basa en el cálculo de esfuerzos resultantes de diferentes condiciones de carga, de la clasificación y superposición de resultados de esfuerzo y de la comparación de los esfuerzos calculados en una categoría o clase asignadas para un valor de esfuerzo permisible.
- **Factor de Resistencia Remanente (RSF).** Se utiliza para definir la aceptabilidad para continuar en servicio de un componente que contiene una falla; en términos de carga de colapso plástico, el RSF se define como:

$$RSF = \frac{L_{CD}}{L_{UC}}$$

Donde:

$L_{CD}$  = Carga de pandeo plástico o límite del componente dañado.

$L_{UC}$  = Carga de pandeo plástico o límite del componente sin daños.

Un valor recomendado para RSF admisible es de 0,9 para equipos de proceso en servicio.

- **Diagrama de Evaluación de Falla (FAD).** El Diagrama de Evaluación de Falla (FAD) se utiliza para la valoración de fallas en forma de grietas en los componentes. La aproximación FAD fue adoptada porque ofrece un método conveniente para proporcionar una medida para la aceptabilidad de un componente con una falla en forma de grieta cuando el mecanismo de falla es medido bajo dos criterios distintos: fractura inestable y carga límite.<sup>8</sup> Debido al defecto que se está abordando en este trabajo, dicho criterio no es tenido en cuenta como criterio de aceptación.

#### 1.4 NIVELES DE EVALUACIÓN

En cada evaluación a partir del daño se proporcionan tres niveles que cubren los procedimientos de evaluación FFS. En general, cada nivel de evaluación proporciona un equilibrio entre el conservatismo, la cantidad de información requerida para la evaluación, la destreza del personal que realiza la evaluación, y la complejidad del análisis que se está haciendo.

Estos tres niveles representan un equilibrio entre la simplicidad y la precisión. Los procedimientos de evaluación simplificados son necesariamente más conservadores que las evaluaciones más sofisticados de ingeniería. En algunos casos, el componente que se está evaluando puede fallar en nivel 1, pero pasar el nivel 2 o el nivel 3 debido a los parámetros muy conservadores utilizados en ese nivel.

- **Nivel 1.** Los procedimientos de evaluación incluidos en este nivel están planeados para proporcionar criterios de monitoreo conservadores que

---

<sup>8</sup> GAMBOA, A,. Tesis de grado: Desarrollo de una herramienta computacional para la enseñanza de la norma API RP 579. Universidad Industrial de Santander, 2011, p. 22-24.

pueden ser utilizados con una cantidad mínima de inspección o información del componente. Las evaluaciones de nivel 1 pueden ser realizadas por personal de ingeniería o de inspección de plantas.

- **Nivel 2.** Los procedimientos de evaluación incluidos en este nivel, están planeados para proporcionar una valoración más detallada que produzca resultados más precisos que los del nivel 1. En una evaluación nivel 2, se requiere información de inspección similar a la requerida para una nivel 1, sin embargo, en ésta se utilizan cálculos más detallados. Las evaluaciones del nivel 2 serían realizadas por ingenieros de planta o especialistas en ingeniería con experiencia en evaluaciones FFS.
- **Nivel 3.** Los procedimientos incluidos en este nivel intentan proporcionar la evaluación más detallada que produzca resultados más precisos que los de nivel 2. En una evaluación nivel 3 se requiere una inspección más detallada y mayor información de los componentes. Además, el análisis recomendado se basa en técnicas numéricas tales como el método de elementos finitos. El análisis de este nivel está diseñado para especialistas en ingeniería con experiencia en evaluaciones FFS.

Como es de esperar, el costo de una evaluación de FFS tiende a incrementarse con su complejidad. Los sofisticados modelamientos que se realizan como parte de una evaluación nivel 3 son, evidentemente, más costosos que un simple cálculo manual, o una evaluación de nivel 1 o nivel 2. Sin embargo, cuando se compara con daños en los equipos y catástrofes al ambiente y al personal, el costo de una evaluación FFS, incluso en el nivel 3, es a menudo insignificante comparado con una evaluación y posterior reparación de los equipos afectados. Es por esto que un

complejo análisis de ingeniería representa un alto nivel de relevancia, ya que permite a una planta evitar una falla catastrófica o una parada no programada, por lo que es sin duda una buena inversión.<sup>9</sup>

### **1.5 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)**

La evaluación de la aptitud para el servicio puede variar en complejidad desde una simple inspección ya sea un nivel 1 o nivel 2 hasta evaluaciones altamente sofisticadas o simulaciones por computador, incluyendo análisis por elementos finitos como lo es el nivel 3. El nivel necesario de complejidad varía de una situación a otra. En algunos casos, un análisis avanzado se realiza cuando una inspección simple no está en condiciones de demostrar que el equipo en cuestión es apto para la continuidad del servicio.

El método de los elementos finitos ha adquirido una gran importancia en la solución de problemas ingenieriles, físicos, etc., ya que permite resolver casos que hasta hace poco tiempo eran prácticamente imposibles de resolver por métodos matemáticos tradicionales. Esta circunstancia obligaba a realizar prototipos, ensayarlos e ir realizando mejoras de forma iterativa, lo que traía consigo un elevado costo tanto económico como en tiempo de desarrollo.<sup>10</sup>

El uso del método de elementos finitos como herramienta computacional es importante porque reduce el número de pruebas en prototipos y simula condiciones que no son fácilmente reproducibles por medio de ensayos. No obstante, de no tenerse una sólida comprensión de la teoría subyacente, estas técnicas podrían originar respuestas erróneas, debido a que siempre darán algún tipo de resultado,

---

<sup>9</sup> AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE AND AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Op. cit., p. 34

<sup>10</sup> MORENO, J., Tesis de grado: Comparativa entre los resultados obtenidos con matlab y nastran mediante el método de los elementos finitos. Universidad Carlos III de Madrid, España, 2009, p. 7-8

independientemente de las condiciones con las cuales fueron planteados los problemas.<sup>11</sup>

La idea general del método de los elementos finitos es la división de un continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo regirán también el del elemento. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), gobernado por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no.

El problema se formula en forma matricial debido a la facilidad de manipulación de las matrices mediante ordenador. Conocidas las matrices que definen el comportamiento del elemento (en el caso estructural serán las llamadas matrices de rigidez, amortiguamiento y masa, aunque esta terminología ha sido aceptada en otros campos de conocimiento) se ensamblan y se forma un conjunto de ecuaciones algebraicas, lineales o no, que una vez resueltas nos proporcionan los valores de los grados de libertad en los nodos del sistema.

En cualquier sistema a analizar podemos distinguir entre:

- Dominio: Espacio geométrico donde se va a analizar el sistema.
- Condiciones de contorno: Variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema (cargas, desplazamientos, temperaturas, voltaje,...)

---

<sup>11</sup> SANTOS, J., Uso de software de elementos finitos Ansys, en el diseño estructural de un vehículo todo terreno. Universidad Pontificia de Bucaramanga, Colombia, 2011, vol 5. P. 1-2.

- Incógnitas. Variables del sistema que deseamos conocer después de que las condiciones de contorno han actuado sobre el sistema: desplazamientos, tensiones, temperaturas, etc. <sup>12</sup>

Actualmente, los programas comerciales son amplios y muy potentes, y problemas complejos pueden ser resueltos por una sola persona en un computador. Hay muchos programas comerciales disponibles: ABAQUS®, FLUENT®, COMSOL® MULTIPHYSICS® y ANSYS® son sólo algunos ejemplos. Una licencia completa de un programa de análisis de elementos finitos suele costar del orden de unos miles de euros. ANSYS® es el programa comercialmente más utilizado de propósito general para análisis de elementos finitos. <sup>13</sup>

**1.5.1 ANSYS®.** Es un programa para el cálculo computacional basado en el MEF, con aplicabilidad a una amplia variedad de problemas habituales en la ingeniería. Este programa cuenta con más de 100.000 líneas de código que le permiten la implementación de análisis estáticos y dinámicos en cálculos de estructuras, así como en problemas de transferencia de calor, fluidos y electromagnetismo.

Como es habitual en todos los programas para cálculo por elementos finitos, ANSYS dispone de tres módulos de trabajo:

---

<sup>12</sup> MÉTODOS NUMÉRICOS.EL MEF Y ANSYS. p.61-63, file:///C:/Users/Toshiba/Downloads/3.%20M%C3%A9todos%20Num%C3%A9ricos.%20El%20M.E.F.%20y%20Ansys%20(1).pdf. [Consulta: Martes, 20 de enero de 2015]

<sup>13</sup> INTRODUCTION TO A FINITE ELEMENT ANALYSIS PROGRAM: ANSYS. p. 3, [https://www.kth.se/social/upload/510291a5f27654096b6112d6/Ansys14\\_classic\\_tutorial\\_lab1.pdf](https://www.kth.se/social/upload/510291a5f27654096b6112d6/Ansys14_classic_tutorial_lab1.pdf) [Consulta: Martes, 20 de enero de 2015].

**Pre-procesador:** Donde se prepara el modelo para el cálculo. En él se realizan las operaciones de:

- Dibujo del modelo, o importación si se ha generado por medio de un sistema CAD que genere ficheros compatibles.
- Selección del tipo de elemento o elementos a emplear. En función del tipo de cálculos a realizar, estos programas suelen disponer de diferentes tipos de elementos que son especiales para cada aplicación. Por ejemplo, suelen tener elementos especiales para cálculos de tensiones planas, tensiones 3D, electrostática, magnetostática, elementos de contacto, etc.
- Selección de los materiales a emplear, que pueden obtenerse por librerías, o ser definidos por el usuario. Esto último es común cuando se emplean materiales de propiedades no lineales o materiales anisótropos.
- Asignación de elemento y propiedades de materiales a los diferentes componentes del modelo.
- Mallado de los componentes del modelo.
- Aplicación de las cargas exteriores (puntuales, lineales o superficiales).
- Aplicación de las condiciones de contorno del modelo.

**Solución:** Es la parte del programa que realiza todo el cálculo del MEF y genera las soluciones. Los pasos que abarca son los siguientes:

Selección del tipo de cálculo a realizar, por ejemplo si es un análisis transitorio, en régimen armónico, estático, de pandeo, etc.

- Configuración de los parámetros de cálculo. Selección de intervalos de tiempo, norma del error, número de iteraciones, etc.
- Inicio del cálculo: el programa empieza transfiriendo las cargas al modelo, genera las matrices de rigidez, realiza la triangulación de la matriz, resuelve el sistema de ecuaciones y genera la solución.

**Post-procesador:** Es la herramienta que permite la representación gráfica de los resultados, así como resultados indirectos que se pueden obtener operando las soluciones del modelo.

Pese a la potencia computacional aportada por el programa, el factor principal para conseguir una aceptable aproximación de los resultados finales con los reales pasará inevitablemente por la aplicación de unos conocimientos mínimos por parte del usuario en cuanto a los métodos empleados por el programa, y sobre todo, en cuanto a la posible fuente de error.<sup>14</sup>

---

<sup>14</sup> MÉTODOS NUMÉRICOS.EL MEF Y ANSYS. Op. cit., p. 70-71

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar una tubería presurizada que presenta pérdida general de material teniendo en cuenta el nivel 3 de evaluación de la norma API RP 579/ASME Fitness For Service usando la técnica de elementos finitos por medio del software de simulación ANSYS®.

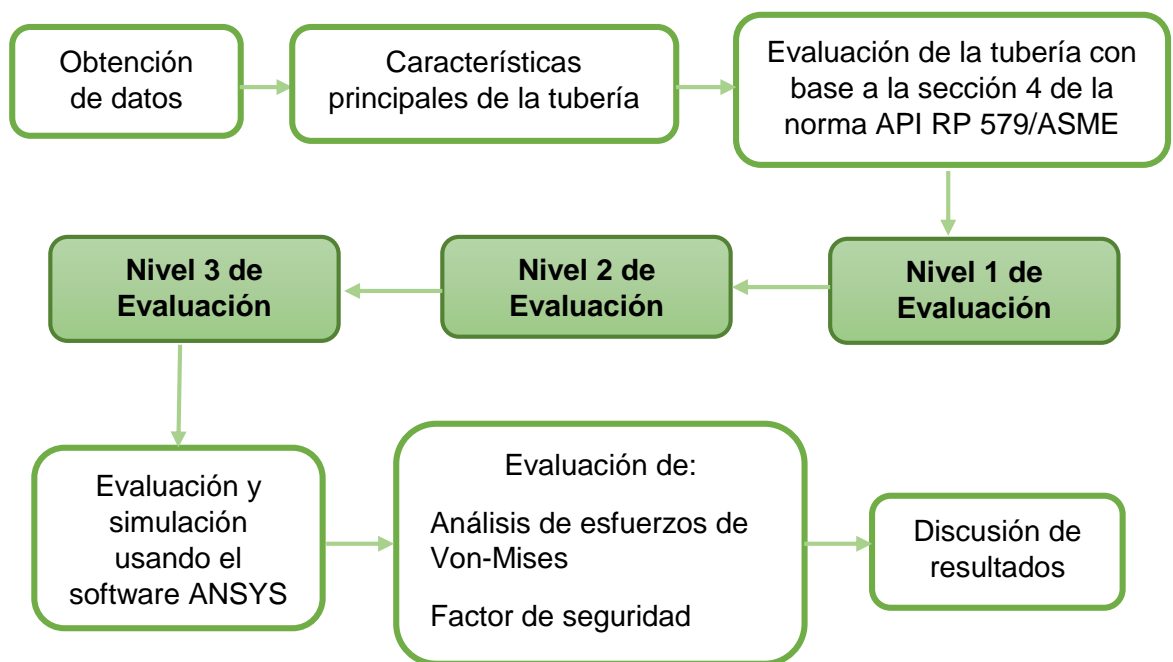
### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Interpretar la metodología de la norma API RP 579/ASME como fundamento para la evaluación de componentes presurizados.
- Evaluar una tubería presurizada que presenta pérdida general de material utilizando los tres niveles de evaluación.
- Simular por medio del software ANSYS® el daño en servicio de una tubería, teniendo en cuenta el nivel 3 de evaluación para proporcionar una valoración más precisa y detallada.

### 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En la figura 2 se muestra el diagrama de flujo del procedimiento en el que se resume la metodología empleada durante el desarrollo de la evaluación de la tubería.

**Figura 2.**Esquema de la metodología.

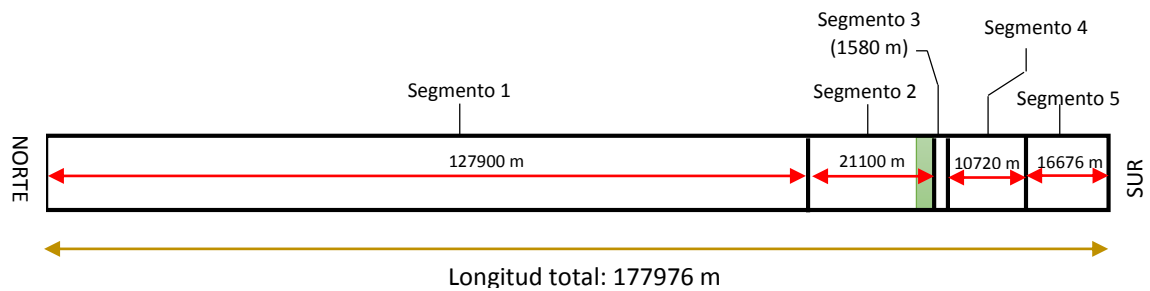


#### 3.1 OBTENCIÓN DE DATOS

Con el fin de establecer un punto de partida para la evaluación y análisis, se obtuvo de una empresa particular, un informe del estado actual de una tubería de aproximadamente 178 km de largo y diseñada para el transporte de gas natural, con protección catódica por corriente impresa a la que se le realizó una evaluación por medio de un pig magnético, encontrándose que la región en donde se estaba

iniciando pérdida de espesor corresponde a un tramo del segundo segmento como se observa en la figura 3.

**Figura 3.** Segmentos que componen la tubería.



Para decidir la viabilidad de continuar en operación con los defectos presentados, se hace necesario realizar una evaluación teniendo en cuenta la sección 4 de la norma API RP 579/ASME Fitness For Service, la cual establece los procedimientos para evaluar componentes a presión que contienen defectos producidos por corrosión los cuales generan pérdida de material y pueden llegar a ocasionar disminuciones críticas en las propiedades mecánicas de la tubería.

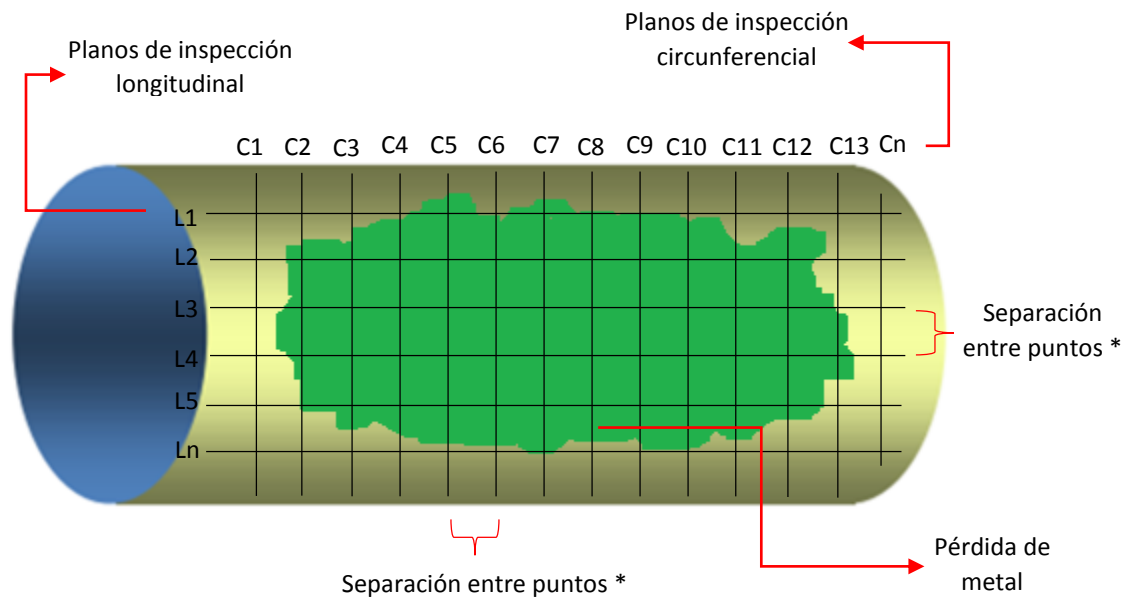
Para iniciar con la evaluación se requiere datos generales de la tubería entre los cuales están: el material de fabricación, dimensiones de la tubería y las lecturas de espesor tomadas en la región en la que se encuentran los defectos usando la técnica de ultrasonido<sup>15</sup> con un transductor de 10 mm de diámetro, dando como resultado pérdida de metal producto de la corrosión.

En la figura 4 se observa un esquema general de la forma como se realiza el mallado utilizando la técnica de ultrasonido alrededor de la región afectada de un

<sup>15</sup> Ver anexo A. Lecturas de espesor tomadas por la técnica de ultrasonido.

componente que presenta corrosión en dirección tanto circunferencial como longitudinal.

**Figura 4.** Distribución general del mallado para la inspección por ultrasonido.



\* Espaciamiento entre puntos establecidos por el inspector en las direcciones longitudinal y circunferencial con base en el perfil de corrosión.

### 3.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA TUBERÍA

Gran parte de las tuberías o tubos de línea se fabrican de acuerdo a la norma API 5L la cual cubre la tubería de línea en acero sin soldadura y con soldadura y establece diferentes aceros con características específicas. El X52 corresponde al gasoducto en estudio. En la tabla 2 y 3 se observa la composición química y las propiedades del acero respectivamente.

**Tabla 2.** Composición química del acero API 5L X52 (% en peso).

Grado	Carbono máximo	Manganeso máximo	Fósforo máximo	Azufre máximo
X52	0.24	1.40	0.030	0.030

**Tabla 3.** Propiedades mecánicas del acero API 5L X52.

Grado	Límite de fluencia		Resistencia a la tracción	
	psi	MPa	Psi	MPa
X52	52.200	360	66.700	460

**Fuente:** CAMACHO, F.,. Análisis elastoplástico de pérdida de metal externas en soldaduras circunferenciales de tuberías a presión, aplicando MEF, México, 2006.

En la tabla 4 se observa las características necesarias para el análisis y evaluación de la tubería. Estos Datos fueron suministrados por la empresa en la que opera el gasoducto.

**Tabla 4.** Condiciones de diseño de la tubería en estudio.

CONDICIONES DE DISEÑO		NOMENCLATURA
Inicio de operación	2007	-
Material de fabricación	API 5L Grado X52	-
Presión de operación	8,34 N/mm <sup>2</sup>	P
Diámetro interno	262,73 mm	Di
Diámetro externo	273,05 mm	De
Espesor nominal	5,16 mm	t <sub>nom</sub>
Pérdida Uniforme de Metal	0,23 mm	LOSS
Corrosión Futura Permisible	2 mm	FCA
Límite de fluencia	360 N/mm <sup>2</sup>	S
Eficiencia de la junta soldada	0,7	E
Factor de resistencia remanente permisible	0,9	RSF <sub>a</sub>
Longitud total del segmento analizado	432 mm	L

Seguido de esto, se procedió a estudiar la norma API RP 579/ASME, centrando la atención en la sección 4, la cual abarca la evaluación para pérdida general de metal. Se aplicaron los niveles de evaluación y se obtuvo una respuesta concreta para el estado de integridad de la tubería con base en la simulación ANSYS®.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para hacer la evaluación de cada uno de los niveles se requiere hacer uso de una serie de ecuaciones que contienen términos asociados a la pérdida de espesor y la integridad de la tubería. Para facilitar el entendimiento en el desarrollo de los cálculos, se resume en la tabla 5 la nomenclatura utilizada en las ecuaciones y su respectivo significado.

**Tabla 5.** Nomenclatura utilizada en los niveles 1 y 2 de evaluación.

NOMENCLATURA	DEFINICIÓN
$D_i$	Diámetro interno.
$D$	Diámetro interno del recipiente corregido con LOSS y FCA.
$E$	Eficiencia de la junta soldada.
$FCA$	Corrosión Futura Permisible.
$L_c$	Longitud crítica.
$LOSS$	Pérdida Uniforme de Metal.
$MAWP$	Máxima Presión de Trabajo Permitida.
$P$	Presión de operación.
$Q$	Factor utilizado para determinar la longitud para el espesor promedio, basado en el factor de resistencia remanente admisible y la relación de espesor remanente.
$R$	Radio interno del recipiente corregido con LOSS y FCA.
$RSFa$	Factor de Resistencia Remanente Permisible.(0,90)
$Rt$	Espesor Remanente.
$S$	Límite de fluencia.
$t_{am}$	Espesor promedio de pared medido basado en el CTP determinado al momento de la inspección.
$t_{am}^C$	Espesor promedio de pared medido basado en el CTP circunferencial.
$t_{am}^L$	Espesor promedio de pared medido basado en el CTP longitudinal.
$t_c$	Espesor de pared corroído.
$t_{lim}$	Espesor límite.

$t_{min}$	Cálculo del espesor mínimo requerido.
$t_{min}^C$	Espesor mínimo calculado según la tensión que actúa en la dirección circunferencial.
$t_{min}^L$	Espesor mínimo calculado según la tensión que actúa en la dirección longitudinal.
$t_{mm}$	Espesor mínimo medido.
$t_{nom}$	Espesor nominal.

#### 4.1 EVALUACIÓN DE LA TUBERÍA CON BASE EN LA SECCIÓN 4 DE LA NORMA API RP 579

Para evaluar la tubería que presenta corrosión se deben determinar los criterios de aceptación tanto en el nivel 1 como en el nivel 2. Para esto se debe realizar previamente una serie de cálculos presentes en la sección 4 de la norma API RP 579/ASME que incluyen espesor mínimo requerido, espesor mínimo medido, espesor de pared corroído, espesor promedio medido y longitud crítica, entre otros.

- **PASO 1** - Cálculo del espesor mínimo requerido,  $t_{min}$

Para calcular el  $t_{min}$  se escoge el máximo valor entre el espesor mínimo requerido circunferencial y longitudinal:

$$t_{min} = \max[t_{min}^C, t_{min}^L]$$

$$t_{min}^c = \frac{PR}{(SE - 0,6P)}$$

$$t_{min}^L = \frac{PR}{(2SE + 0,4P)}$$

$$R = \left(\frac{Di}{2}\right) + FCA + LOSS$$

$$R = \left(\frac{Di}{2}\right) + FCA + LOSS$$

$$t_{min}^c = \frac{(8,34)(133,595)}{[(360)(0,7) - 0,6(8,34)]}$$

$$t_{min}^L = \frac{(8,34)(133,595)}{[2(360)(0,7) + 0,4(8,34)]}$$

$$t_{min}^c = 4,5103 \text{ mm}$$

$$t_{min}^L = 2,1923 \text{ mm}$$

$$t_{min} = \max[4,5103 ; 2,1923]$$

$$t_{min} = 4,5103 \text{ mm}$$

- **PASO 2** - Cálculo del espesor mínimo medido en el momento de la inspección con los datos de perfil,  $t_{mm}$

$$t_{mm} = 4,3 \text{ mm}$$

Dato obtenido de la mínima medida registrada en la tabla de lecturas de espesor, tanto en el plano longitudinal como en el plano circunferencial, luego de haber seleccionado los mínimos valores en cada una de las direcciones. (Ver anexo B).

- **PASO 3** - Cálculo del espesor de pared corroído,  $t_C$

$$t_C = t_{nom} - LOSS - FCA$$

$$t_C = 5,16 - 0,23 - 2$$

$$t_C = 2,93 \text{ mm}$$

- **PASO 4** - Cálculo del factor de espesor remanente,  $Rt$

$$Rt = \frac{t_{mm} - FCA}{t_C}$$

$$Rt = \frac{4,3 - 2}{2,93}$$

$$Rt = 0,7849$$

- **PASO 5** - Calculo de longitud crítica,  $L_C$

$$L_C = Q\sqrt{D * t_C}$$

Cálculo de diámetro y factor  $Q$  para determinar la longitud crítica,  $L_C$

Para  $Rt < RSF_a$

$$D = D_i + 2(LOSS + FCA)$$

$$D = 262,73 + 2(0,23 + 2)$$

$$D = 267,19 \text{ mm}$$

$$Q = 1,123 \left[ \left( \frac{1 - Rt}{\frac{1 - Rt}{RSF_a}} \right)^2 - 1 \right]^{0,5}$$

$$Q = 1,123 \left[ \left( \frac{1 - 0,7849}{\frac{1 - 0,7849}{0,9}} \right)^2 - 1 \right]^{0,5}$$

$$Q = 1,5195$$

$$L_C = Q\sqrt{D * t_c}$$

$$L_C = 1,5195\sqrt{267,19 * 2,93}$$

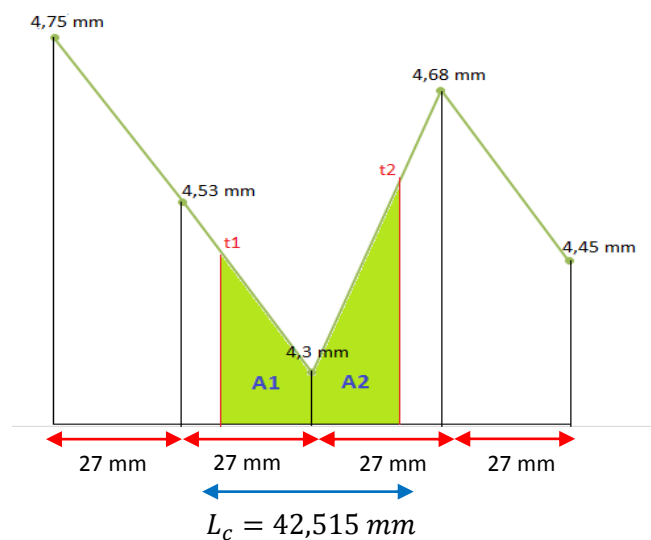
$$L_C = 42,515 \text{ mm}$$

Como se observa, esta longitud crítica  $L_C$  representa un valor pequeño comparado con la longitud total del tramo analizado de la tubería, por lo que se tendrá en cuenta a la hora de realizar la evaluación del nivel 3 de la norma con la simulación, para comparar la distribución de los esfuerzos más críticos y dar una respuesta más clara acerca del tipo de corrosión que está afectando internamente la tubería.

- **PASO 6** – Calculo del espesor promedio medido,  $t_{am}^L$  basado en el CTP longitudinal y el espesor promedio medido,  $t_{am}^C$  basado en el CTP circunferencial.

Antes de hallar el espesor promedio medido se debe determinar el CTP (Perfil de Espesor Critico). El CTP en cada dirección, tanto longitudinal como circunferencial, se obtiene de proyectar el mínimo valor de las lecturas de espesor tomadas de la técnica de ultrasonido contra la distancia de separación entre cada lectura (27 mm). Una vez realizado el CTP se procede a determinar el espesor promedio medido tanto en el plano circunferencial como en el plano longitudinal utilizando el método de las áreas, el cual consiste en calcular la sumatorias de las áreas que están dentro de la longitud crítica y dividirla por esta misma, teniendo en cuenta que la mitad de la longitud crítica se ubica en el mínimo punto tomado del promedio de cada plano, como se observa en las figuras 5 y 6.

**Figura 5.**CTP longitudinal generado por las lecturas de espesor para la tubería en estudio. \*



\* La figura solo muestra los puntos cercanos al espesor mínimo medido, debido que es la región de interés para el cálculo del espesor promedio medido.

$$t_{am}^L = \frac{\sum A}{L_C}$$

$$t_1 = 4,3 + (4,53 - 4,3) \left( \frac{21,2575}{27} \right) = 4,48 \text{ mm}$$

$$t_2 = 4,3 + (4,68 - 4,3) \left( \frac{21,2575}{27} \right) = 4,60 \text{ mm}$$

$$A_1 = \frac{4,3 + 4,48}{2} (21,2575) = 93,32 \text{ mm}^2 \quad A_2 = \frac{4,3 + 4,60}{2} (21,7525) = 94,60 \text{ mm}^2$$

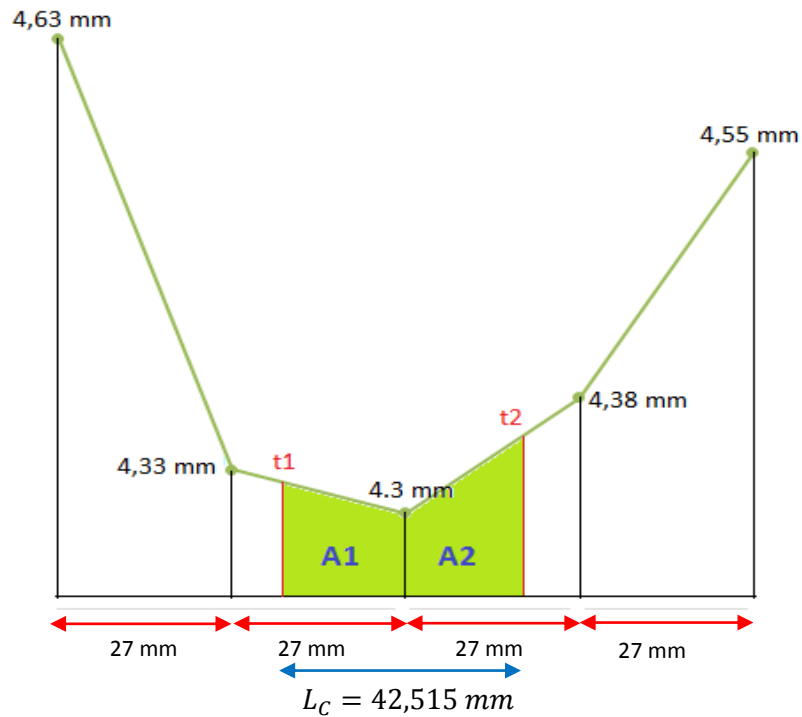
$$A_1 + A_2 = 93,32 + 94,60$$

$$\sum A = 187,92 \text{ mm}^2$$

$$t_{am}^L = \frac{187,92}{42,515}$$

$$t_{am}^L = 4,42 \text{ mm}$$

**Figura 6.**CTP circunferencial generado por las lecturas de espesor para la tubería en estudio.\*



\* La figura solo muestra los puntos cercanos al espesor mínimo medido, debido que es la región de interés para el cálculo del espesor promedio medido.

$$t_{am}^c = \frac{\sum A}{L_c}$$

$$t_1 = 4,3 + (4,33 - 4,3) \left( \frac{21,2572}{27} \right) = 4,32 \text{ mm}$$

27 mm                      27 mm

$$t_2 = 4,3 + (4,38 - 4,3) \left( \frac{21,2575}{27} \right) = 4,36 \text{ mm}$$

$$A1 = \frac{4,3 + 4,32}{2}(21,2575) = 91,62 \text{ mm}^2 \quad A2 = \frac{4,3 + 4,36}{2}(21,2575) = 92,04 \text{ mm}^2$$

$$A1 + A2 = 91,62 + 92,04$$

$$\sum A = 183,66 \text{ mm}^2$$

$$t_{am}^c = \frac{183,66}{42,515}$$

$$t_{am}^c = 4,32 \text{ mm}$$

Ya obtenidos todos los datos anteriores, se inicia la evaluación de los criterios de aceptación.

## 4.2 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN NIVEL 1

✓ Recordando que:

$$t_{am}^L = 4,42 \text{ mm}$$

$$t_{min}^L = 2,19 \text{ mm}$$

$$t_{am}^c = 4,32 \text{ mm}$$

$$t_{min}^c = 4,51 \text{ mm}$$

$$t_{mm} = 4,3 \text{ mm}$$

$$FCA = 2 \text{ mm}$$

$$t_{lim} = \max[0,2 * t_{nom}, 2,5] = \max[(0,2 * 5,16), 2,5] = 2,5 \text{ mm}$$

$$1). t_{am}^L - FCA > t_{min}^C$$

$$4,42 - 2 > t_{min}^C$$

$$2,42 \text{ mm} > 4,51 \text{ mm}$$

**NO SATISFACE**

$$2). t_{am}^C - FCA > t_{min}^L$$

$$4,32 - 2 > t_{min}^L$$

$$2,32 \text{ mm} > 2,19 \text{ mm}$$

**SI SATISFACE**

$$3). t_{mm} - FCA \geq \max[0,5 * t_{min}, t_{lim}]$$

$$4,3 - 2 \geq \max[(0,5)(4,51), 2,5]$$

$$2,3 \geq \max[2,25, 2,5]$$

$$2,3 \text{ mm} \geq 2,5 \text{ mm}$$

**NO SATISFACE**

Como se observa en los resultados anteriores, solo se satisface uno de los criterios de evaluación nivel 1, lo que indica que la tubería no puede seguir operando bajo las mismas condiciones llevando a realizar algunas de las siguientes recomendaciones según API RP 579/ASME:

- Reparar, recalibrar, reemplazar o retirar el componente.
- La región de pérdida de metal se puede evaluar usando los procedimientos de evaluación de la sección 5 (Pérdida local de metal) de la norma.
- Realizar una evaluación nivel 2.

En este caso se optó por realizar un nivel 2 de evaluación, ya que los procedimientos incluidos en este nivel, están planeados para proporcionar una valoración más detallada que produzca resultados más precisos que los del nivel 1.

#### 4.3 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN NIVEL 2

$$1). t_{am}^L - FCA \geq RSF_a * t_{min}^c$$

$$4,42 - 2 \geq (0,9)(4,51)$$

$$2,42 \text{ mm} \geq 4,06 \text{ mm}$$

**NO SATISFACE**

$$2). t_{am}^c - FCA \geq RSF_a * t_{min}^L$$

$$4,32 - 2 \geq (0,9)(2,19)$$

$$2,32 \text{ mm} \geq 1,97 \text{ mm}$$

**SI SATISFACE**

De acuerdo a lo anterior, se debe realizar una nueva evaluación o modificar las condiciones de operación debido a que uno de los resultados no cumple con los criterios propuestos para el nivel 2 de evaluación. Se requiere avanzar hacia un análisis de nivel 3 en el cual, con la ayuda de un simulador y un análisis más específico y exacto usando la técnica de elementos finitos, se obtengan respuestas concisas acerca de la situación de esfuerzos presentes en la tubería.

Sin embargo, si no se realiza dicho análisis de nivel 3, se requiere encontrar una nueva presión de operación bajo la cual la tubería pueda seguir funcionando sin riesgo de presentar una falla.

#### 4.3.1 Máxima presión de operación admisible

$$MAWP = \min[MAWP_c, MAWP_L]$$

$$MAWP_c = \frac{SEt_c}{R + 0,6 * t_c}$$

$$MAWP_L = \frac{2SEt_c}{R - 0,4t_c}$$

$$MAWP_c = \frac{(360)(0,7)(2,93)}{133,595 + (0,6)(2,93)}$$

$$MAWP_L = \frac{2(360)(0,7)(2,93)}{133,595 - (0,4)(2,93)}$$

$$MAWP_c = 5,4551 \text{ MPa}$$

$$MAWP_L = 11,1515 \text{ MPa}$$

$$MAWP = \min[5,4551; 11,1515]$$

$$MAWP = 5,4551 \text{ MPa}$$

De acuerdo a lo que se esperaba, esta nueva presión de trabajo máxima admisible corresponde a un valor menor al que opera actualmente la tubería dado que con la presencia de los defectos de corrosión ya vistos, una de las soluciones para seguir operando es disminuir la presión del flujo de gas. Bajo estas nuevas condiciones la

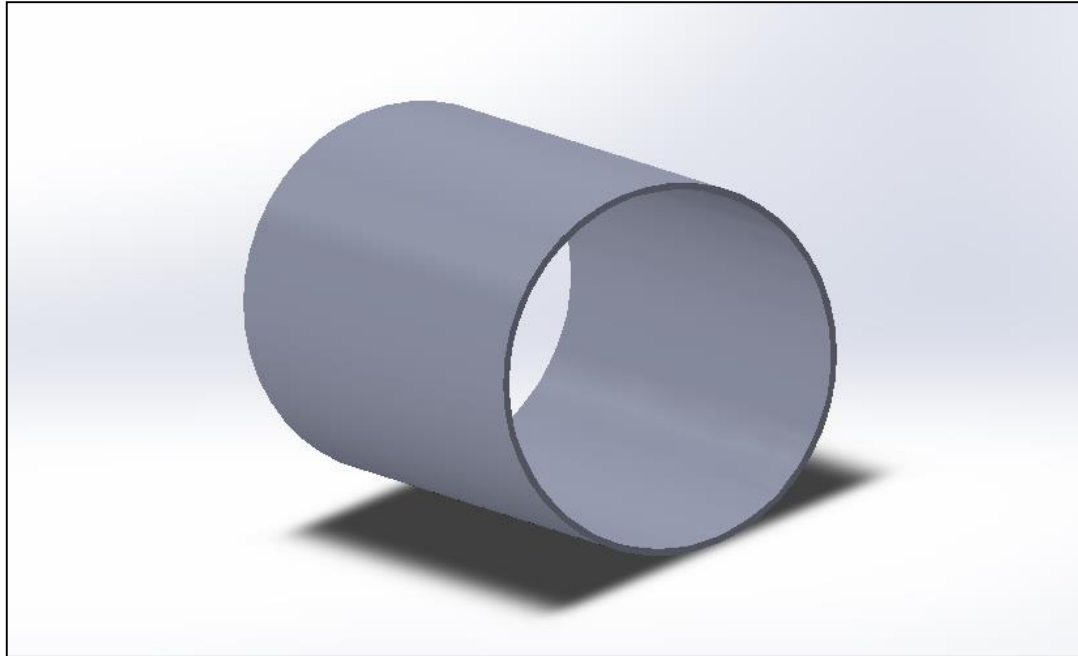
tubería no presentará fallas aún con los defectos de corrosión que la están afectando, sin embargo para comprobar esa hipótesis, en los cálculos del nivel 3 se simulará la operación de la tubería para verificar que los esfuerzos disminuyen hasta el punto de garantizar la seguridad. Además de esto, si efectivamente la nueva presión resulta aceptable para seguir operando, es incierto si dicha presión es admisible respecto a factores como eficiencia y rentabilidad para la compañía.

En el siguiente capítulo se presentarán los resultados arrojados por la evaluación nivel 3 de la norma API RP 579/ASME, el cual proporciona con el software ANSYS una evaluación más detallada de los defectos actuales producidos por corrosión. Se obtendrán resultados más precisos que la evaluación nivel 2, debido a que tiene en cuenta la evaluación de esfuerzos y el factor de seguridad, evaluados bajo el método de los elementos finitos.

#### **4.4 NIVEL 3 DE EVALUACIÓN**

Antes de entrar a analizar la tubería en el software ANSYS® con el fin de evaluar la concentración de defectos de corrosión que están generando pérdida de material y acumulación de esfuerzos, se realizó la estructura de la tubería en Solidworks® para importarla a ANSYS versión 14.5 e iniciar la evaluación nivel 3 de la norma API RP 579/ASME. Se ha utilizado el entorno Workbench®, el cual permite integrar en una sola herramienta desde los análisis preliminares más simples hasta los más complejos estudios de detalle y validación, basándose en el método de elementos finitos.

**Figura 7.**Modelo virtual de la tubería generada en Solidworks.



En la figura 7 se muestra la tubería realizada en Solidworks, a través de la licencia académica con la que cuenta la universidad. Para realizarla se tuvo en cuenta cada una de las lecturas de espesor tomadas por la técnica de ultrasonido las cuales representan el espesor generado a lo largo de su longitud.

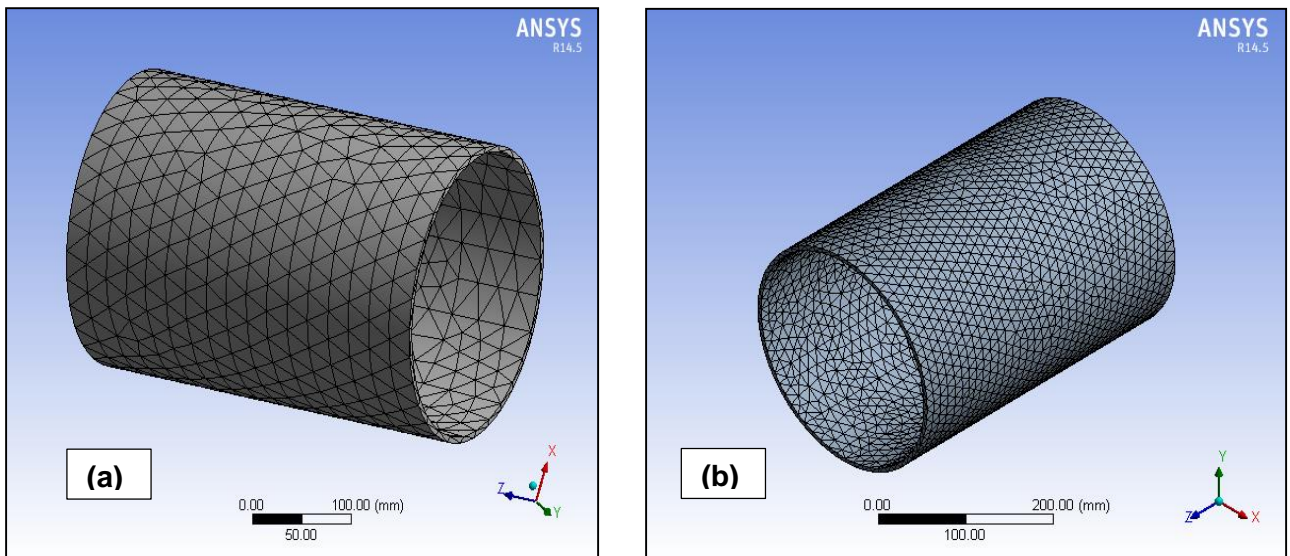
#### **4.5 MODELO DE SIMULACIÓN NUMÉRICA PARA LA EVALUACIÓN DEL NIVEL 3 CON EL USO DEL SOFTWARE ANSYS**

El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejo (en dos o tres dimensiones). Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia en la práctica ingenieril los métodos numéricos, y en particular los elementos finitos se convierten en la única alternativa práctica del cálculo.

La metodología de análisis del software de elementos finitos consta de tres pasos: el pre-proceso, el cálculo, y por último el post-proceso.

**4.5.1 Pre-proceso.** Inicialmente se definen las propiedades mecánicas del material y se genera la malla, esta en general consta de miles de puntos llamados nodos, que sirven de base para la discretización del dominio en elementos finitos. La creación de un mallado adecuado es fundamental a la hora de obtener buenos resultados. Cuanto mas fina sea la malla más aproximados serán los resultados obtenidos, sin embargo, mayor será el tiempo de procesado. Para la tubería el simulador realizó un mallado automático con 2955 elementos, lo que representa 6105 nodos, como se observa en la figura 8.a, despues de una serie de iteraciones se refinó la malla hasta llegar a tener 309890 elementos, lo que representa 482519 nodos como se observa en la figura 8.b

**Figura 8.** Mallado utilizado en la simulación de la tubería. (a) Malla automática generada por el simulador. (b) Malla final refinada obtenida en la última iteración.



**4.5.2 Cálculo con elementos finitos.** El paso a seguir después del pre-proceso es definir en el simulador las cargas actuantes sobre la tubería para así obtener las mismas características de la pieza original y generar una solución confiable y útil para la toma de decisiones respecto al funcionamiento de la tubería por medio del cálculo con elementos finitos.

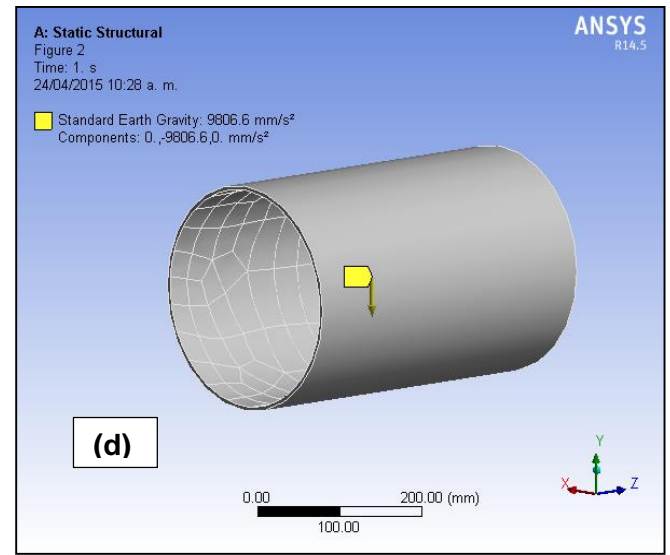
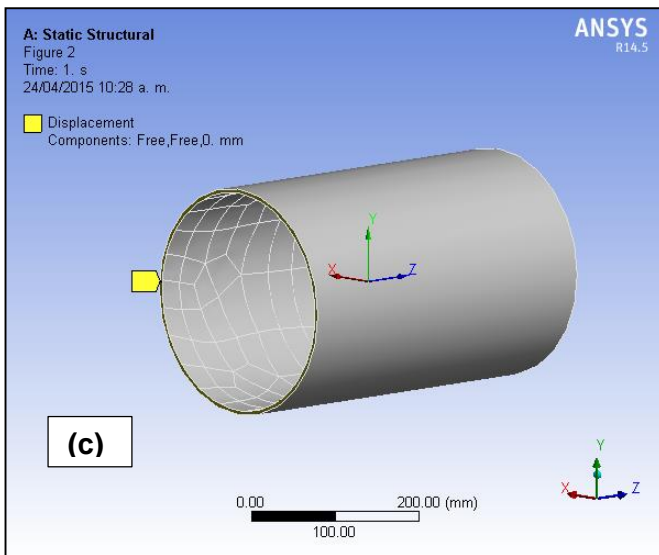
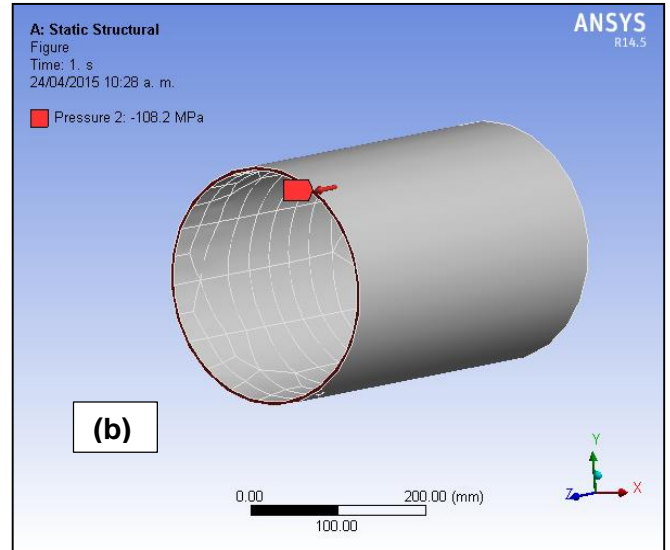
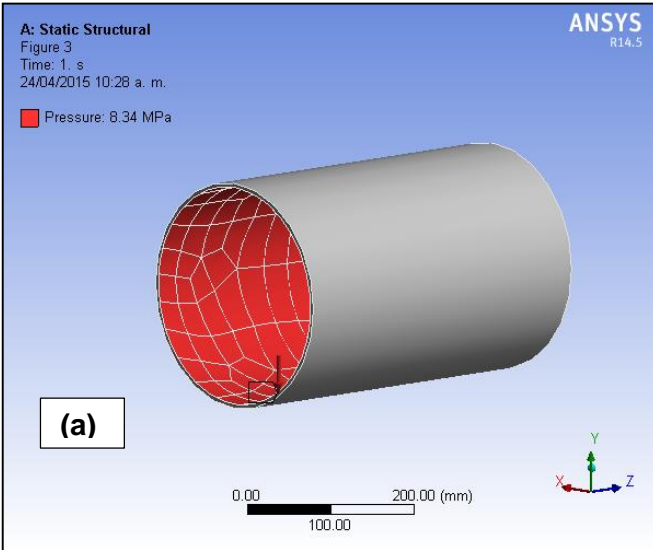
Las condiciones de contorno establecidas son: la presión de operación de 8,34 MPa que va direccionada hacia todas las caras internas de la tubería (figura 9. a), la presión de 108.2 MPa direccionada hacia uno de los extremos calculado teóricamente como respuesta al esfuerzo longitudinal de la tubería<sup>16</sup> (figura 9.b), el desplazamiento con restricción en la dirección longitudinal ubicada en el otro extremo de la tubería (figura 9.c) y por último la gravedad en dirección -Y (figura 9.d).

Adicionalmente, se establecen las características propias del material como son el límite de fluencia, siendo para el acero específico de la tubería (API 5L X52) 360 MPa, y la resistencia a la tracción 460 MPa.

---

<sup>16</sup> Ver anexo C. Cálculos teórico de los esfuerzos presentes en la tubería.

**Figura 9.** Condiciones estructurales iniciales. (a) Presión interna. (b) Presión longitudinal. (c) Desplazamiento con restricción longitudinal. (d) Gravedad.



**4.5.3 Post-proceso.** En esta etapa se tratan los resultados obtenidos de la resolución del sistema para obtener representaciones gráficas de esfuerzo de Von - Mises y factor de seguridad, de los análisis realizados que permitan extraer conclusiones del problema.

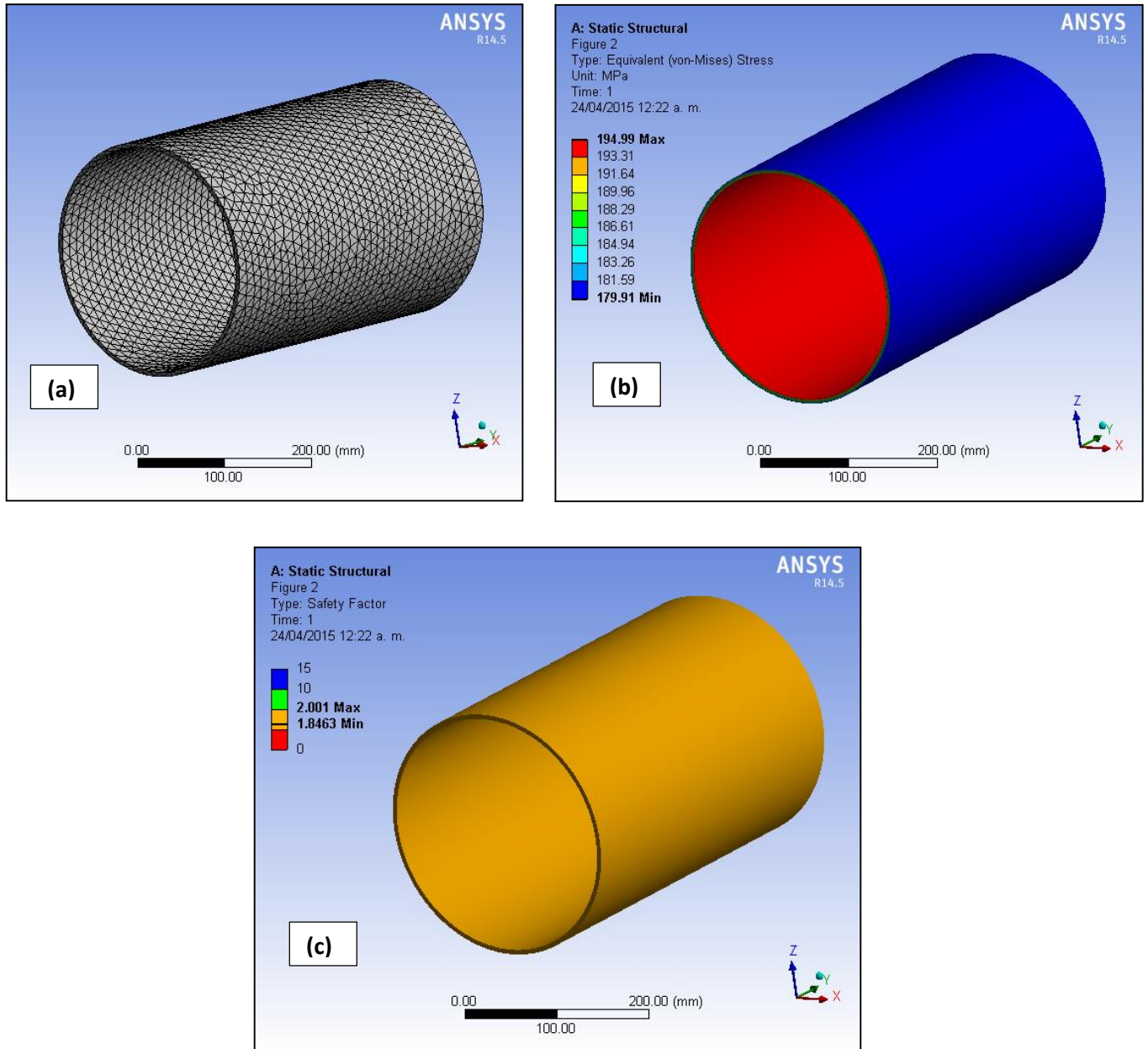
- **Esfuerzo equivalente de Von - Mises y factor de seguridad con una presión de operación de 8,34 MPa en la tubería sin defecto.**

Con el fin de tener un punto de partida para comparar los resultados de la tubería que está presentando corrosión, se simuló la tubería sin corrosión teniendo en cuenta que presenta un espesor uniforme correspondiente al espesor nominal de 5,16 mm. Con base en esta tubería se escogieron las condiciones iniciales de contorno bajo las cuales se simularía la tubería que presenta corrosión con presión de operación normal y presión disminuida calculada teóricamente. Se calculó teóricamente los esfuerzos en la dirección longitudinal, circunferencial y radial<sup>17</sup> (teniendo en cuenta que en las tuberías de pared delgada se maneja un estado de tensión plana debido a que los esfuerzos radiales se aproximan a cero) y se verificó que las condiciones de contorno establecidas eran las apropiadas puesto que al simular, los resultados obtenidos eran los más cercanos a los teóricos.

---

<sup>17</sup> Ver Anexo C. Comparación de cálculos teóricos y simulados de esfuerzos y factor de seguridad presentes en la tubería sana.

**Figura 10.** Mallado y resultados de la tubería sin defecto. (a) Distribución de la malla. (b) Esfuerzo equivalente de Von - Mises. (c) Factor de seguridad.

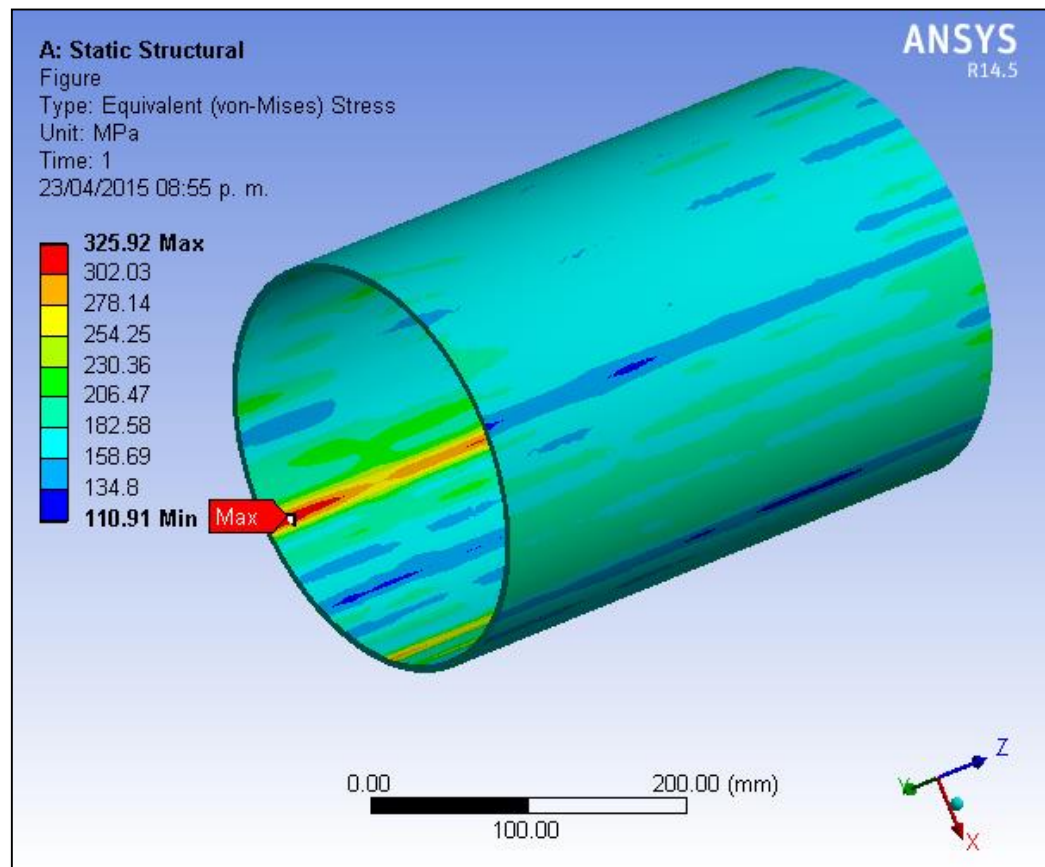


De forma general se encontró que la tubería sana presenta un esfuerzo de Von - Mises máximo de 195 MPa en la pared interna, y un esfuerzo mínimo en la pared externa de 180 MPa como se observa en la figura 10.b; De igual manera se

presenta un factor de seguridad mínimo en la pared interna de 1,8 y máximo de 2 en la pared externa según la figura 10.c. Estos esfuerzos son totalmente uniformes a lo largo de las paredes debido a la configuración homogénea del espesor, propia de las tuberías que no han experimentado daños por corrosión. Además, el cambio de los valores presentados en las paredes interna y externa de la tubería son ocasionados por la presión del flujo de gas.

- **Esfuerzo equivalente de Von - Mises y factor de seguridad con una presión de operación de 8,34 MPa en la tubería con defecto.**

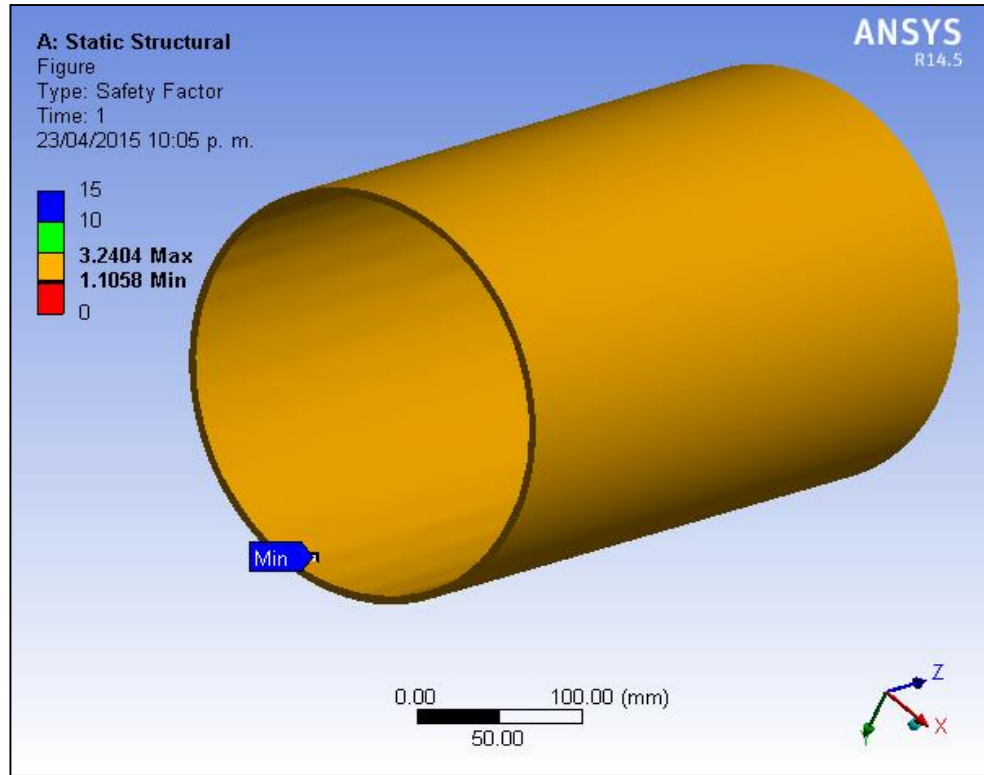
**Figura 11.** Esfuerzo equivalente de Von - Mises con una presión de 8,34 MPa.



En la figura 11 se observa la tubería con una distribución de esfuerzos que se están generando con las condiciones a las que se está operando. La presencia de diferentes tonos se debe a que el espesor de la tubería no es uniforme por lo tanto el tener espesores de mayor o menor valor generan diferentes valores de esfuerzo.

De acuerdo a esa distribución de esfuerzos, se estima una concentración de tensiones máxima de 325,92 MPa en una pequeña región a lo largo de la dirección longitudinal de la tubería. Esto se debe a que los espesores mínimos que se están presentando debido al ataque por corrosión, se ubican en esa región generando un aumento en la concentración de esfuerzos y disminuyendo sus propiedades mecánicas. Teniendo en cuenta que la fluencia del material inicia en 360 MPa, se aprecia que el máximo valor de esfuerzo que presenta la tubería está próximo a alcanzar fluencia y deformarse permanentemente lo que indica que hay que tomar medidas correctivas ya que según la teoría las tuberías no deben trabajar con esfuerzos que superen el 72% del límite de fluencia, lo que en este caso correspondería a 259,2 MPa. Cabe aclarar también que en la mayoría de la tubería se presentan espesores no tan críticos ya que según la imagen, se están generando esfuerzos con un promedio de 170 MPa, lo que sería aceptable para continuar operando. Por esto, por la longitud crítica obtenida y por la forma como se distribuyen los espesores que han alcanzado un adelgazamiento notable y que afectaron la resistencia de la tubería hasta esfuerzos críticos (solo una pequeña región a lo largo del eje longitudinal) se podría afirmar que la forma de corrosión que se está presentando es localizada y no generalizada.

**Figura 12.**Factor de seguridad con una presión de 8,34 MPa.

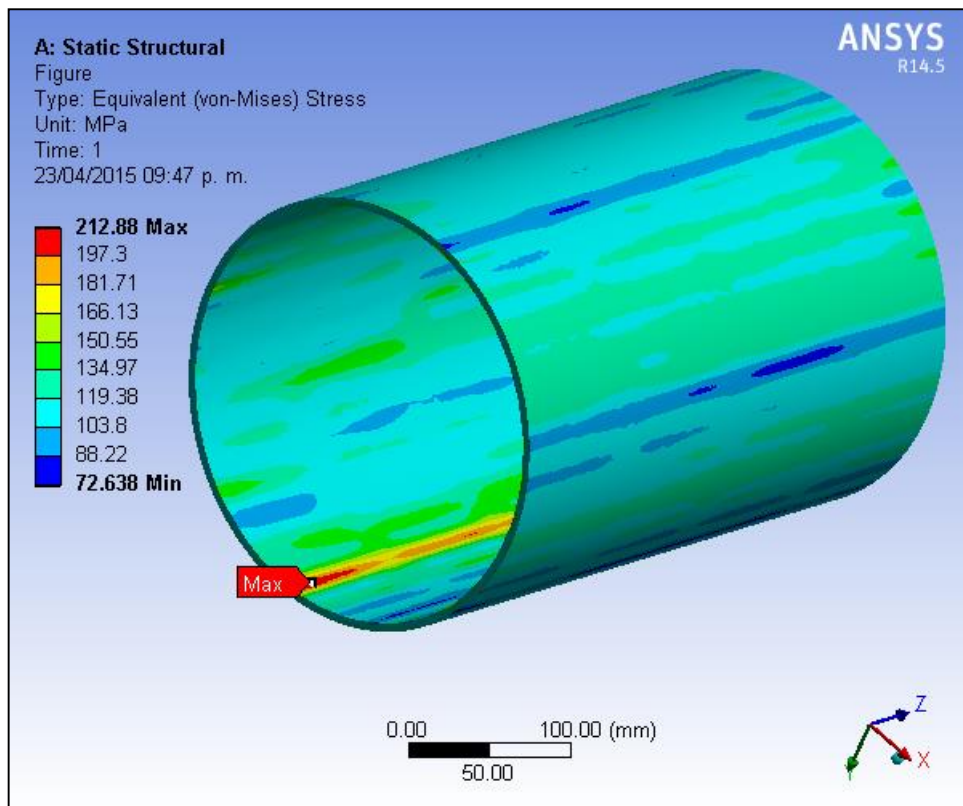


En consecuencia con los esfuerzos obtenidos, la figura 12 muestra que la tubería está presentando un factor de seguridad mínimo de 1,1 en la zona que presentó el mayor nivel de esfuerzo provocado por el mínimo espesor que está presentando la tubería, lo cual, como se vio en la imagen anterior, aumenta el nivel de esfuerzo. En la longitud restante, la tubería podría estar soportando alrededor de 2,3 veces la carga actual a la que está sometida, lo que sería admisible para continuar operando si no se presentara el espesor mínimo que disminuye el factor a un valor poco aceptable.

- **Esfuerzo equivalente de Von - Mises y factor de seguridad con una presión de operación teórica calculada de 5,45 MPa en la tubería con defecto.**

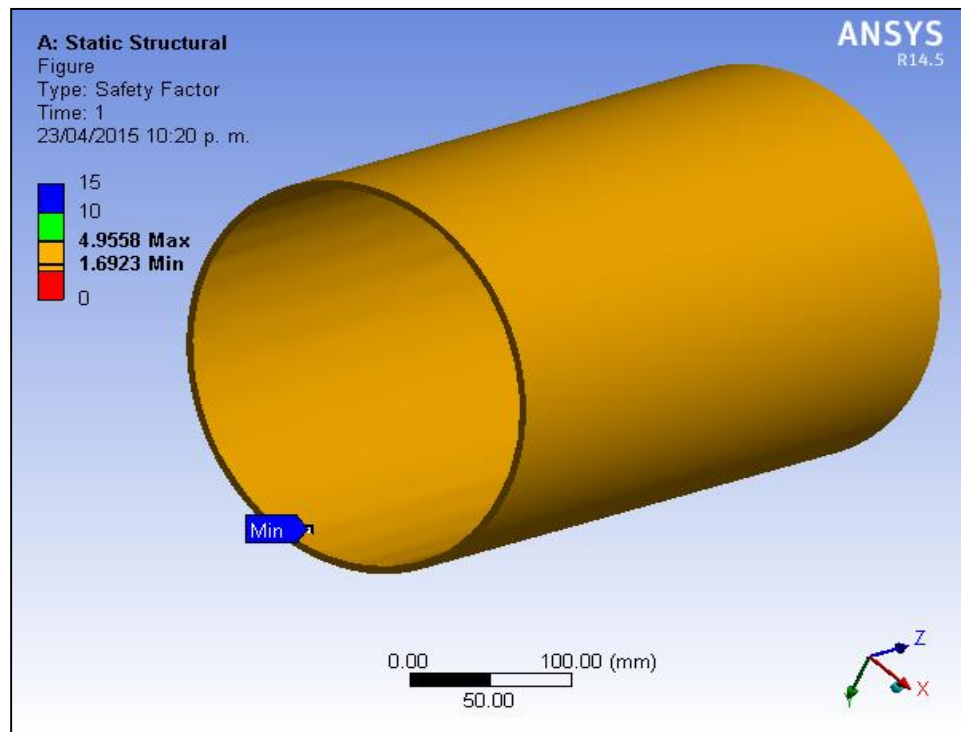
Esta presión de 5,45 MPa se calculó en el numeral 4.3.1 y se simulará con el fin de demostrar que al disminuir la presión de operación, los esfuerzos disminuyen y el factor de seguridad aumenta, generando una solución para poder continuar en operación aún con la corrosión que se está presentando.

**Figura 13.** Esfuerzo equivalente de Von - Mises con una presión de 5,45 MPa.



Al disminuir la presión de operación se observa en la figura 13 que cualitativamente la distribución de esfuerzos mantiene el mismo comportamiento de distribución de colores que con la presión de 8,34 MPa debido a que los espesores siguen siendo iguales y el problema es elástico lineal. Sin embargo, los valores de esos esfuerzos disminuyen debido a que al operar a una presión menor, la tubería experimenta menores esfuerzos en las zonas adelgazadas; es decir, se pasa de un esfuerzo de 325,92 MPa en la presión de operación normal, a un esfuerzo de 212,88 MPa con la nueva presión calculada. Este nuevo esfuerzo es aceptable para operación segura con base en lo dicho anteriormente, en donde según la teoría, el máximo esfuerzo al que debería operar la tubería es de 259,2 MPa. Por lo tanto, basados en los esfuerzos, se comprueba que al disminuir la presión de operación se mejora las condiciones de seguridad, afirmación que se sustenta con el factor de seguridad obtenido, mostrado en la figura 14, el cual presenta un valor mínimo de 1,7 en la zona que ha venido presentando el máximo valor de esfuerzos, y un promedio de 3,1 alrededor de la mayor parte de la tubería, valores más seguros que los obtenidos bajo presión de 8,34 MPa (FS mínimo de 1,1 y máximo de 2,3) lo que indica que al disminuir la presión de operación, las condiciones de esfuerzos y factor de seguridad se mejoran haciendo posible continuar con la operación pero haciendo un seguimiento periódico de la zona más afectada por la corrosión.

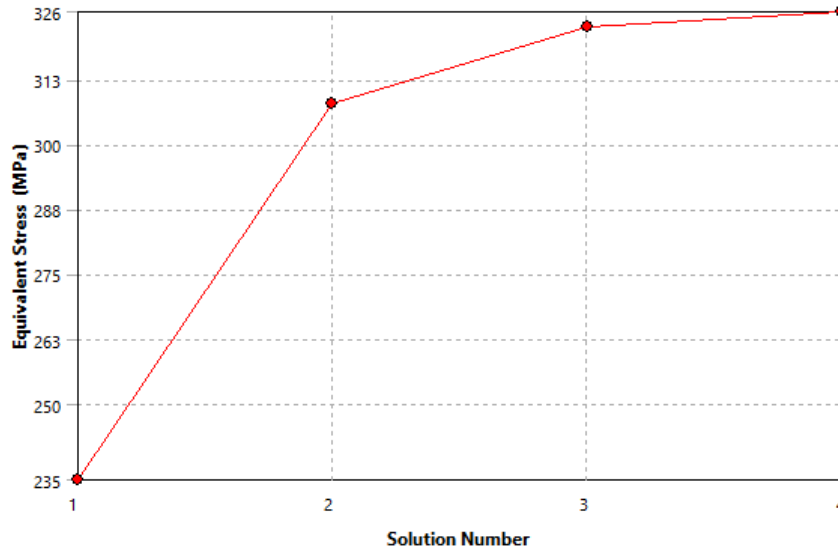
**Figura 14.**Factor de seguridad con una presión de 5,45 MPa.



- **Convergencia de los resultados**

Con el fin de validar los resultados obtenidos, además de comparar los esfuerzos simulados con los teóricos, se realizó un análisis de convergencia de la solución a los cálculos realizados en el simulador como se muestra en las figuras 15 y 16.

**Figura 15.**Convergencia del esfuerzo equivalente para una presión de operación de 8,34 MPa en la tubería con defecto.



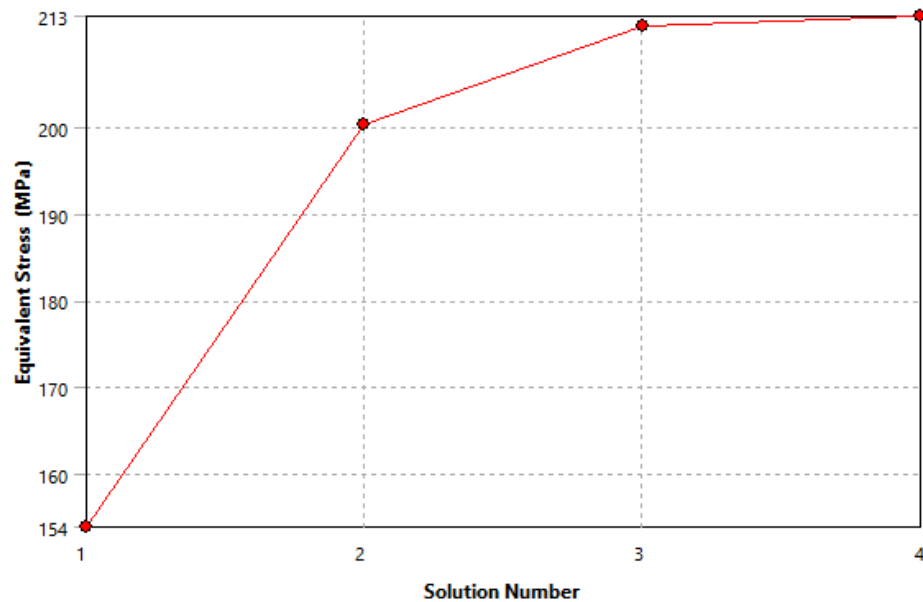
**Tabla 6.** Datos obtenidos por la convergencia con una presión de 8,34 MPa.

	Esfuerzo Equivalente (MPa)	Cambio (%)	Nodos	Elementos
1	235.4		6105	2955
2	307.86	26.677	30433	14911
3	322.78	4.733	139383	81636
4	<b>325.56</b>	<b>0.85459</b>	<b>482519</b>	<b>309890</b>

En la figura 15 y tabla 6 se observa como el simulador realizó cuatro soluciones para la tubería que presenta defectos de corrosión con la presión de operación de 8,34 MPa, en las cuales se aprecia que la primera solución inició con un esfuerzo de 235,4 MPa usando 2955 elementos, lo que representa 6105 nodos, hasta llegar a la última solución, en donde el esfuerzo equivalente aumenta hasta 325,56 MPa

con un cambio en el resultado con respecto al penúltimo de solo 0,85% pero con un aumento en los nodos hasta 482519 y 309890 elementos. Estos resultados numéricos se observan en la figura puesto que se aprecia cómo las soluciones inicialmente varían constantemente pero al finalizar las iteraciones los resultados convergen hacia un mismo valor.

**Figura 16.** Convergencia del esfuerzo equivalente para una presión de operación de 5,45 MPa en la tubería con defecto.

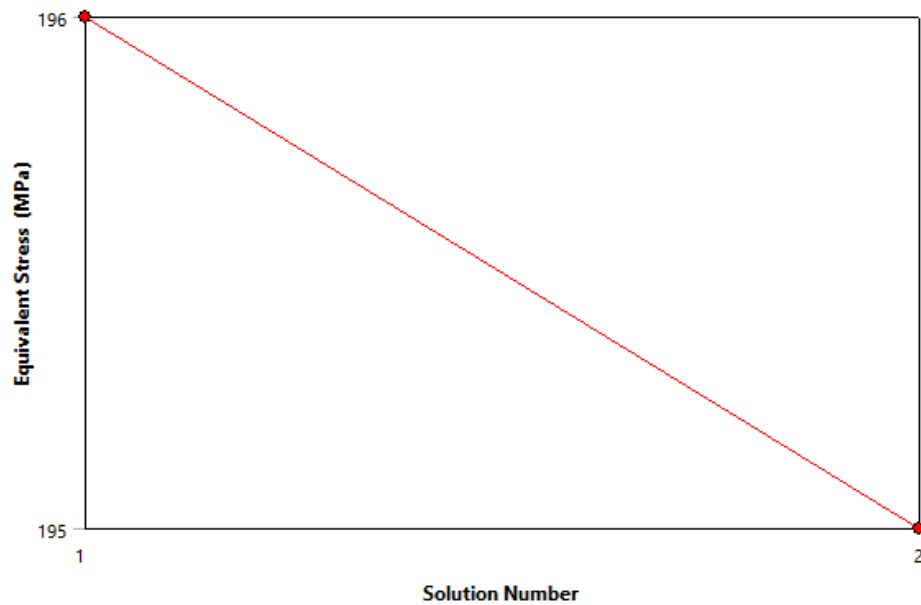


**Tabla 7.** Datos obtenidos por la convergencia con una presión de 5,45 MPa.

	Esfuerzo Equivalente (MPa)	Cambio (%)	Nodos	Elementos
1	153.83		6105	2955
2	200.32	26.258	30381	14882
3	211.77	5.5564	136171	79681
4	<b>212.88</b>	<b>0.52169</b>	<b>490283</b>	<b>314974</b>

El mismo comportamiento se observa en la figura 16 y tabla 7 para la tubería con defectos pero con presión de operación disminuida. El simulador realiza una serie de iteraciones hasta alcanzar la convergencia de los resultados.

**Figura 17.**Convergencia del esfuerzo equivalente para la tubería sin defecto.



**Tabla 8.**Datos obtenidos por la convergencia en la tubería sin defecto.

	Esfuerzo Equivalente (MPa)	Cambio (%)	Nodos	Elementos
1	195.82		25141	12388
2	<b>194.99</b>	<b>-0.42667</b>	<b>101393</b>	<b>50285</b>

Para la tubería sana solo se presentaron dos iteraciones debido a que la geometría es completamente homogénea, por lo que para el simulador es mucho más fácil encontrar la convergencia. Sin embargo, el hecho de iterar solo dos veces no significa que no se haya llegado a la solución verdadera. En la tabla que arroja los cálculos se observa cómo el esfuerzo pasa de 195,82 Mpa en la primera iteración con 25141 nodos y 12388 elementos a un valor de esfuerzo de 194,99 MPa con 101393 nodos y 50285 elementos, es decir, el número de nodos y elemento se aumentó por el orden de cuatro veces y sin embargo el cambio en los resultados fueron de solo el 0,42%, indicando que el cálculo hecho es correcto.

## 5. CONCLUSIONES

- Al realizar este trabajo se consiguió conocer la metodología de evaluación basada en la pérdida general de material de la norma API RP 579/ASME Fitness For Service y se pudo aplicar el procedimiento establecido para la evaluación del defecto presente. La aplicación de estos procedimientos conlleva a saber que es indispensable tener conocimiento en el diseño, operación y mantenimiento, ya que son factores de vital importancia para un correcto análisis de los resultados, lo que garantiza que los equipos que contengan este tipo de defectos sean identificados durante una inspección y puedan seguir operando de manera segura.
- Se conoció la importancia de manejar análisis de componentes que presentan defectos usando la técnica de elementos finitos, la cual no se había estudiado ni manejado a lo largo del plan de estudios de Ingeniería Metalúrgica a pesar de ser la herramienta principal que hoy en día se está usando en los análisis y toma de decisiones para equipos de la industria que presentan defectos, ya que proporcionan una solución altamente confiable y exacta frente a problemas puntuales y preguntas comunes como son la posibilidad de continuar o no en operación.
- Al evaluar los defectos de corrosión interna presentes en la tubería usando los criterios de evaluación de nivel 1 y nivel 2 basados en la pérdida de espesor, se encontró que no se satisfacían por completo todos los criterios de aceptación evaluados, y que estos niveles son más conservadores que el nivel 3 debido a que hacen uso de menos datos característicos de la tubería. Al no satisfacerse todos los criterios evaluados por estos dos primeros niveles, se calculó una nueva presión de

operación como opción para seguir operando aún con los defectos de corrosión presentes.

- Como respuesta a que no se cumplieron con todos los criterios de evaluación de nivel 1 y nivel 2, se avanzó hacia una evaluación más detallada y exacta de nivel 3 usando el análisis por elementos finitos con el simulador ANSYS®. Se encontró que la tubería en estudio no es apta para continuar en servicio según los resultados del análisis de esfuerzos de Von-Mises y factor de seguridad, debido a que la pérdida de espesor más crítica provocó una concentración de esfuerzos máxima en una pequeña región en la dirección longitudinal de la tubería, los cuales superan el máximo esfuerzo admisible al que se puede operar, y los que a su vez están muy cerca de alcanzar el límite de fluencia del material.
- Se comprobó que los cálculos realizados en el nivel dos para encontrar la nueva presión máxima de operación fueron útiles como opción para que la tubería continuara en operación aún con los defectos presentes. Al simular bajo estas condiciones los esfuerzos disminuyen notablemente, quedando por debajo del nivel máximo de esfuerzo al que puede operar la tubería, y a su vez el factor de seguridad es más confiable, haciendo segura la operación.
- Con la simulación de la tubería y la forma en la que se ubican los defectos críticos, la longitud crítica de corrosión obtenida, y la ubicación de los esfuerzos máximos, se concluye que la pérdida de material es localizada y no generalizada ya que la disminución de espesor más significativa se concentra en una sola región y no una distribución crítica en toda la pared interna de la tubería como inicialmente se esperaba. Para iniciar con la evaluación de este trabajo se asumió que la corrosión era general debido a que es un mecanismo muy frecuente y además los datos arrojados por el pig magnético solo indican que hay concentración de defectos

en ciertas regiones, mas no dan respuesta específica a si la corrosión es localizada o generalizada.

- Se comprobó que las condiciones de contorno establecidas fueron las apropiadas para obtener resultados acertados, dado que los cálculos teóricos y los simulados arrojaron los mismos resultados tanto para el esfuerzo de Von - Mises en las tres direcciones principales (longitudinal, circunferencial y radial) como para el factor de seguridad. Además, se generó la malla que mejor se ajustó para simular las condiciones reales pero se recomienda usar una versión no académica en la que se pueda crear una malla más fina en la región donde se presentó el máximo nivel de esfuerzos.
- Durante todo el proceso de aprendizaje y evaluación se comprobó que es totalmente necesario que la persona encargada de realizar los análisis tenga conocimiento de los elementos finitos y las propiedades de los materiales ya que el simulador siempre arrojará algún tipo de resultados y la confiabilidad de ellos depende de los datos introducidos y los análisis que haga la persona encargada de los mismos.

## 6. RECOMENDACIONES

- Continuar con el uso y estudio de herramientas tan versátiles para el análisis de componentes que pueden presentar fallas, como son los simuladores y los análisis por elementos finitos, ya que para los Ingenieros Metalúrgicos brindan una ayuda computacional que arroja resultados altamente confiables siempre que se manejen correctamente.
- Para garantizar la efectividad de la evaluación se recomienda que la persona tenga conocimientos básicos de integridad de equipos.
- Los datos suministrados correspondientes a la tubería, propiedades del material y condiciones de diseño, fueron muy reducidos, por lo que algunos factores necesarios para la evaluación fueron obtenidos con base en criterios generales descritos por la norma. Por esto, se recomienda que antes de realizar la evaluación se proporcionen todos los datos necesarios para un cálculo más preciso.
- La morfología de los defectos no está representados exactamente a escala real debido a que los datos suministrados fueron por SCAN-A. Para obtener una representación más exacta se requieren datos de espesor usando la técnica de ultrasonido SCAN-B O SCAN-C

## BIBLIOGRAFÍA

- ALMEIDA, J., RODRIGUES, M., DA SILVA, R. Modelagem e solução transiente-térmica numérica da integridade estrutural de um vaso de pressão cilíndrico com corrosão usando fitness-for-service. Brasil, 2014.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE AND AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service. Segunda edición. API, 2007.
- DELGADO, L., RUEDA, L,. Tesis de grado: Desarrollo de una herramienta computacional para el análisis y evaluación de defectos de manera sistematizada, basados en la norma API RP 579 fitness for service. Universidad Industrial de Santander, 2013.
- GAMBOA, A,. Tesis de grado: Desarrollo de una herramienta computacional para la enseñanza de la norma API RP 579. Universidad Industrial de Santander, 2011.
- SZARY, T. The Finite Element Method Analysis for Assessing the Remaining Strength of Corroded Oil Field Casing and Tubing. Technischen Universität Bergakademie Freiberg, 2006.

## ANEXOS

### Anexo A: Lecturas de espesor tomadas por la técnica de ultrasonido.

Sección		Gt 1	Gt 2	Gt 3	Gt 4	Gt 5	Gt 6	Gt 7	Gt 8	Gt 9	Gt 10	Gt 11	Gt 12	Gt 13	Gt 14	Gt 15	Gt 16	Gt 17	Gt 18	Gt 19	Gt 20	Gt 21	Gt 22	Gt 23	Gt 24	Gt 25	Gt 26	Gt 27	Gt 28	Gt 29	Gt 30	Gt 31	
		PLANOS DE INSPECCIÓN CIRCUNFERENCIAL																															
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25	C26	C27	C28	C29	C30	C31	
A	L1	5,13	4,85	4,75	4,93	4,83	4,55	5	5,05	5,05	5,1	5	4,68	4,98	4,98	5	4,7	4,68	5,08	5,05	4,93	4,55	4,85	5,18	5,1	5,15	5,13	5,13	5,15	4,95	4,68	4,8	
B	L2	5,08	4,88	4,68	4,95	4,8	4,68	4,93	5,08	5,1	5,15	4,95	4,63	4,9	4,9	5,08	4,65	4,65	5,13	5,05	4,83	4,53	4,7	5,1	5,1	5,13	5,1	5,1	5,13	5,1	5,03	5,05	
C	L3	4,75	5,1	4,75	4,95	4,93	4,83	4,78	5	5,05	5,15	4,95	4,93	4,93	4,9	5,03	4,63	4,83	5,08	5,05	4,95	4,58	4,7	5,1	5,1	5,15	5,15	5,13	5,15	5,1	4,98	4,95	
D	L4	5	5,15	4,65	4,9	4,8	4,75	4,88	5,1	5,1	5,13	4,88	4,98	4,88	4,98	5,05	4,58	4,78	4,9	5,05	4,78	4,65	4,55	5,1	5,1	5,1	5,13	5,1	5,1	5,03	5,03	4,83	
E	L5	4,9	5,08	4,75	5,03	4,93	4,73	4,93	5,25	4,98	5,25	5,03	4,85	4,98	4,93	4,95	4,65	4,83	5,05	5,15	5,05	4,88	4,75	5,15	5,18	5,15	4,65	5,15	5,25	5,08	4,93	5,03	
F	L6	4,75	5,15	4,63	5	4,88	4,9	4,93	5,23	5,2	5,25	5,08	4,9	5,03	4,88	5,08	4,6	4,7	5,05	5,15	5,13	4,88	4,9	5,15	5,03	5,1	5,05	5,18	5,15	5,05	4,9	4,9	
G	L7	5,03	5,15	4,6	5,08	4,9	4,6	4,93	4,95	5,18	5,23	5	4,95	4,9	4,93	5,03	4,75	4,65	5,08	5,18	4,88	4,75	4,7	5,18	5,2	5,13	4,73	5,2	5,15	4,98	5,05	4,9	
H	L8	5,08	5,2	4,6	5	4,95	4,75	5	5,13	5,03	5,25	4,95	4,6	4,93	4,93	5	4,65	4,63	5,1	5,2	5,15	4,75	4,7	5,18	5,05	5,25	4,65	5,2	5,13	4,65	5	4,83	
I	L9	5	5,08	4,58	4,93	4,78	4,93	4,93	5,1	4,93	5,25	4,85	4,73	4,93	4,9	5,1	4,63	4,7	5,18	5,03	5	4,68	4,7	5,15	5,18	5,2	4,75	5,2	5,1	4,9	5,03	4,83	
J	L10	5,08	4,83	4,48	4,83	4,8	4,6	4,95	4,93	5,18	5,35	4,7	4,83	4,9	4,95	5	4,65	4,85	5,15	5,05	5,13	4,93	4,65	5,18	5,05	5,18	4,93	5,15	5,18	4,93	5,23	4,73	
K	L11	5,15	4,85	4,5	4,9	4,9	4,55	4,83	4,93	4,93	5,23	4,73	4,93	5,05	4,95	5,05	4,55	4,9	5,13	4,88	5,08	4,83	4,75	5,13	5,15	5,18	4,88	5,2	5,1	5,03	5,2	4,85	
L	L12	5,13	4,83	4,48	4,68	4,7	4,6	4,93	4,78	4,68	5,25	4,5	4,85	4,98	4,98	5,08	4,65	4,7	5,13	4,83	5,05	4,85	4,68	5,15	5,13	5,18	4,83	5,2	5,08	4,93	5,23	4,9	
M	L13	5,15	4,85	4,63	4,9	4,93	4,75	4,98	4,93	4,83	5,2	4,65	4,95	5,05	5,08	5,13	4,83	4,83	5,15	5,03	4,88	4,75	4,7	5,25	5,15	5,15	4,98	5,25	4,95	5,1	5,13	4,75	
N	L14	5,05	4,95	4,33	4,75	4,45	4,5	4,85	4,88	4,55	5,05	4,58	4,9	4,9	5,05	5,05	4,65	5,03	5,13	5,05	4,98	4,85	4,6	5,13	5,1	5,15	4,7	4,85	5	4,8	5,13	4,68	
O	L15	4,78	4,7	4,3	4,8	4,48	4,5	4,9	4,68	4,7	5,1	4,45	4,78	4,98	4,98	5,05	4,48	4,93	5,15	4,93	4,93	4,83	4,9	5,15	5,1	5,2	4,58	4,9	4,9	4,9	5,15	4,8	
P	L16	5,1	4,53	4,38	4,98	4,58	4,68	4,7	4,9	4,6	5,13	4,55	4,73	4,98	4,86	5,15	4,63	4,85	5,2	4,93	4,95	4,75	4,85	5,1	4,95	5,2	4,75	4,85	4,85	4,85	4,9	5,1	4,88
Q	L17	5,08	4,9	4,55	4,93	4,6	4,65	4,75	4,95	4,85	4,95	4,68	4,8	5,05	4,93	5	4,63	4,95	5,25	4,98	5,05	4,85	4,88	5,13	5,15	4,98	4,73	4,63	4,83	4,75	5	4,8	

**Anexo B. Selección del espesor mínimo medido en cada dirección**

PLANOS DE INSPECCIÓN LONGITUDINAL	PLANOS DE INSPECCIÓN CIRCUFERENCIAL															
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
L1	5,13	4,85	4,75	4,93	4,83	4,55	5	5,05	5,05	5,1	5	4,68	4,98	4,98	5	4,7
L2	5,08	4,88	4,68	4,95	4,8	4,68	4,93	5,08	5,1	5,15	4,95	4,63	4,9	4,9	5,08	4,65
L3	4,75	5,1	4,75	4,95	4,93	4,83	4,78	5	5,05	5,15	4,95	4,93	4,93	4,9	5,03	4,63
L4	5	5,15	4,65	4,9	4,8	4,75	4,88	5,1	5,1	5,13	4,88	4,98	4,88	4,98	5,05	4,58
L5	4,9	5,08	4,75	5,03	4,93	4,73	4,93	5,25	4,98	5,25	5,03	4,85	4,98	4,93	4,95	4,65
L6	4,75	5,15	4,63	5	4,88	4,9	4,93	5,23	5,2	5,25	5,08	4,9	5,03	4,88	5,08	4,6
L7	5,03	5,15	4,6	5,08	4,9	4,6	4,93	4,95	5,18	5,23	5	4,95	4,9	4,93	5,03	4,75
L8	5,08	5,2	4,6	5	4,95	4,75	5	5,13	5,03	5,25	4,95	4,6	4,93	4,93	5	4,65
L9	5	5,08	4,58	4,93	4,78	4,93	4,93	5,1	4,93	5,25	4,85	4,73	4,93	4,9	5,1	4,63
L10	5,08	4,83	4,48	4,83	4,8	4,6	4,95	4,93	5,18	5,35	4,7	4,83	4,9	4,95	5	4,65
L11	5,15	4,85	4,5	4,9	4,9	4,55	4,83	4,93	4,93	5,23	4,73	4,93	5,05	4,95	5,05	4,55
L12	5,13	4,83	4,48	4,68	4,7	4,6	4,93	4,78	4,68	5,25	4,5	4,85	4,98	4,98	5,08	4,65
L13	5,15	4,85	4,63	4,9	4,93	4,75	4,98	4,93	4,83	5,2	4,65	4,95	5,05	5,08	5,13	4,83
L14	5,05	4,95	4,33	4,75	4,45	4,5	4,85	4,88	4,55	5,05	4,58	4,9	4,9	5,05	5,05	4,65
L15	4,78	4,7	4,3	4,8	4,48	4,5	4,9	4,68	4,7	5,1	4,45	4,78	4,98	4,98	5,05	4,48
L16	5,1	4,53	4,38	4,98	4,58	4,68	4,7	4,9	4,6	5,13	4,55	4,73	4,98	4,86	5,15	4,63
L17	5,08	4,9	4,55	4,93	4,6	4,65	4,75	4,95	4,85	4,95	4,68	4,8	5,05	4,93	5	4,63
<b>CTP LONGITUDINAL</b>	4,75	4,53	4,3	4,68	4,45	4,5	4,6	4,68	4,55	5,95	4,45	4,6	4,88	4,86	4,95	4,48

  $t_{mm}$

PLANOS DE INSPECCIÓN LONGITUDINAL	PLANOS DE INSPECCIÓN CIRCUFERENCIAL															
	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25	C26	C27	C28	C29	C30	C31	CTP CIRCUFERENCIAL
L1	4,68	5,08	5,05	4,93	4,55	4,85	5,18	5,1	5,15	5,13	5,13	5,15	4,95	4,68	4,8	4,55
L2	4,65	5,13	5,05	4,83	4,53	4,7	5,1	5,1	5,13	5,1	5,1	5,13	5,1	5,03	5,05	4,53
L3	4,83	5,08	5,05	4,95	4,58	4,7	5,1	5,1	5,15	5,15	5,13	5,15	5,1	4,98	4,95	4,58
L4	4,78	4,9	5,05	4,78	4,65	4,55	5,1	5,1	5,1	5,13	5,1	5,1	5,03	5,03	4,83	4,55
L5	4,83	5,05	5,15	5,05	4,88	4,75	5,15	5,18	5,15	4,65	5,15	5,25	5,08	4,93	5,03	4,65
L6	4,7	5,05	5,15	5,13	4,88	4,9	5,15	5,03	5,1	5,05	5,18	5,15	5,05	4,9	4,9	4,6
L7	4,65	5,08	5,18	4,88	4,75	4,7	5,18	5,2	5,13	4,73	5,2	5,15	4,98	5,05	4,9	4,6
L8	4,63	5,1	5,2	5,15	4,75	4,7	5,18	5,05	5,25	4,65	5,2	5,13	4,65	5	4,83	4,6
L9	4,7	5,18	5,03	5	4,68	4,7	5,15	5,18	5,2	4,75	5,2	5,1	4,9	5,03	4,83	4,58
L10	4,85	5,15	5,05	5,13	4,93	4,65	5,18	5,05	5,18	4,93	5,15	5,18	4,93	5,23	4,73	4,48
L11	4,9	5,13	4,88	5,08	4,83	4,75	5,13	5,15	5,18	4,88	5,2	5,1	5,03	5,2	4,85	4,5
L12	4,7	5,13	4,83	5,05	4,85	4,68	5,15	5,13	5,18	4,83	5,2	5,08	4,93	5,23	4,9	4,48
L13	4,83	5,15	5,03	4,88	4,75	4,7	5,25	5,15	5,15	4,98	5,25	4,95	5,1	5,13	4,75	4,63
L14	5,03	5,13	5,05	4,98	4,85	4,6	5,13	5,1	5,15	4,7	4,85	5	4,8	5,13	4,68	4,33
L15	4,93	5,15	4,93	4,93	4,83	4,9	5,15	5,1	5,2	4,58	4,9	4,9	4,9	5,15	4,8	4,3
L16	4,85	5,2	4,93	4,95	4,75	4,85	5,1	4,95	5,2	4,75	4,85	4,85	4,9	5,1	4,88	4,38
L17	4,95	5,25	4,98	5,05	4,85	4,88	5,13	5,15	4,98	4,73	4,63	4,83	4,75	5	4,8	4,55
CTP LONGITUDINAL	4,63	4,9	4,83	4,78	4,53	4,55	5,1	4,95	4,98	4,58	4,63	4,83	4,65	4,68	4,68	

4,3  
↓  
*t<sub>mm</sub>*

**Anexo C.** Comparación de cálculos teóricos y simulados de esfuerzos y factor de seguridad presentes en la tubería sana

Con el fin de demostrar que las condiciones de contorno bajo las cuales se simuló fueron las adecuadas, se realizan los cálculos teóricos de los esfuerzos presentes en la tubería asumiendo un espesor uniforme de 5,16mm.

Diámetro Interno = 262,73 mm

Presión (P)= 8,34 MPa

Diámetro externo = 273,05 mm

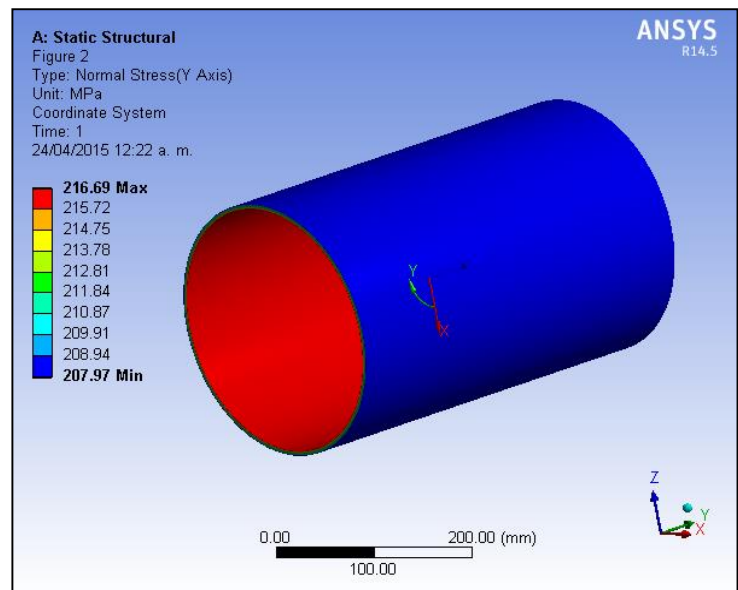
Espesor (t)= 5,16 mm

Diámetro medio (D)=267,89 mm

- **Esfuerzo circunferencial.** ( $\sigma_c$ )

**Figura 18.** Esfuerzo circunferencial de la tubería sin defecto.

$$\sigma_c = \frac{P * D}{2t}$$
$$\sigma_c = \frac{8,34 * 267,89}{2 * 5,16}$$
$$\sigma_c = 216,4925 \text{ MPa}$$

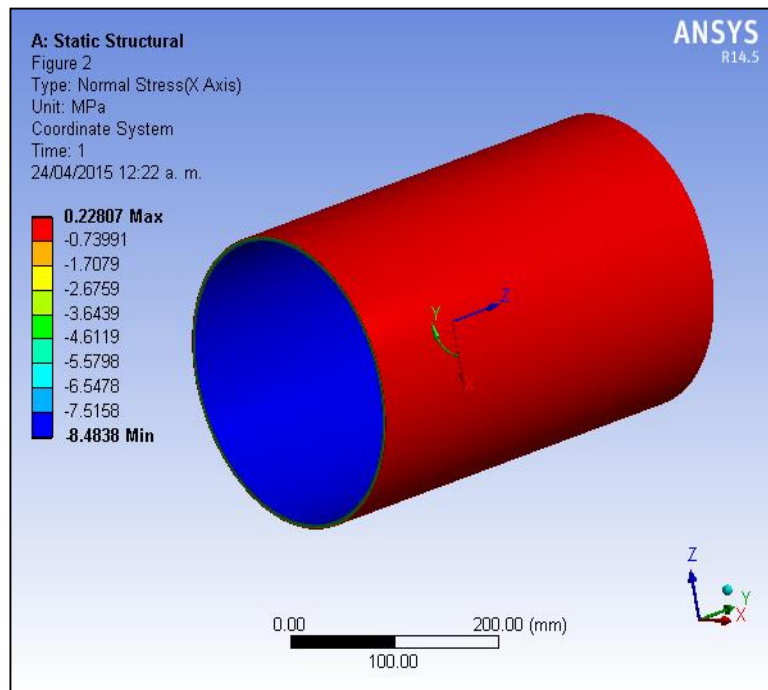


- **Esfuerzo radial ( $\sigma_r$ )**

$$\sigma_r = 0$$

(Para tuberías de pared delgada)

**Figura 19.** Esfuerzo radial de la tubería sin defecto.



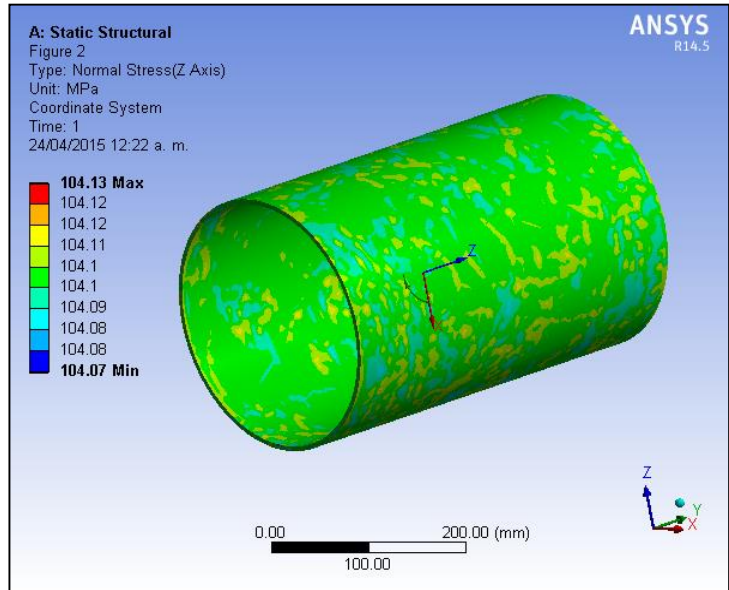
- **Esfuerzo longitudinal. ( $\sigma_L$ )**

**Figura 20.** Esfuerzo longitudinal de la tubería sin defecto.

$$\sigma_L = \frac{P * D}{4t}$$

$$\sigma_L = \frac{8,34 * 267,89}{4 * 5,16}$$

$$\sigma_L = 108,24625 \text{ MPa}$$



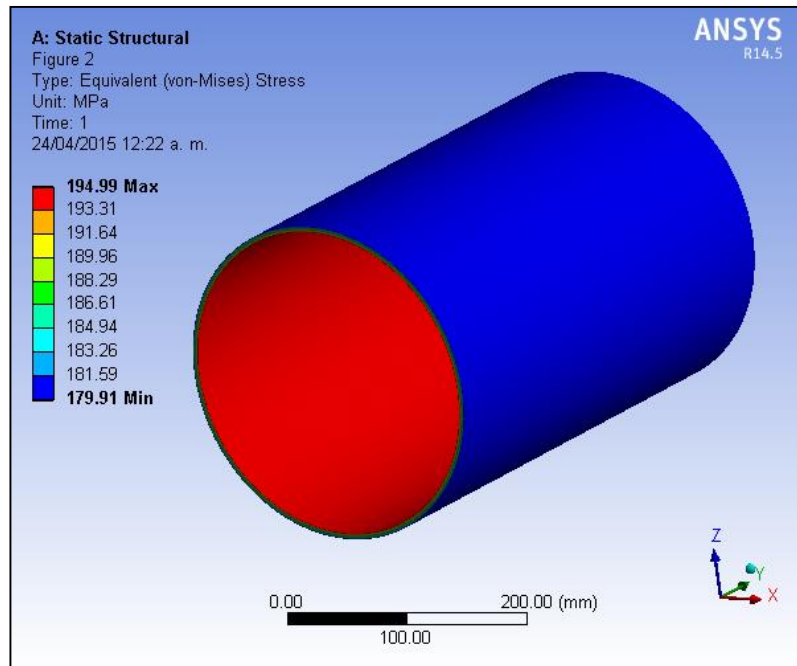
- **Esfuerzo de Von Mises. ( $\sigma_{VM}$ )**

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_L^2 + (\sigma_c * \sigma_L)^2}$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{(216,5)^2 + (108,2)^2 + (216,5 * 108,2)^2}$$

$$\sigma_{VM} = 187,5 \text{ MPa}$$

**Figura 21.** Esfuerzo equivalente de Von - Mises de la tubería sin defecto.



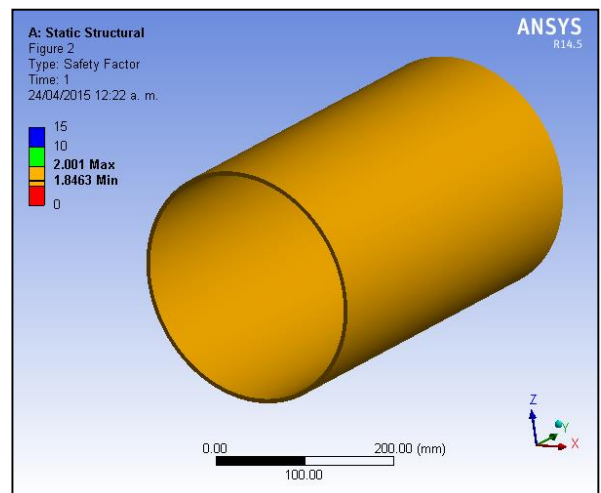
- **Factor de seguridad. (FS)**

**Figura 22.** Factor de seguridad de la tubería sin defecto.

$$FS = \frac{\text{Límite de fluencia}}{\sigma_{VM}}$$

$$FS = \frac{360}{187,5}$$

$$FS = 1,92$$



Estos valores teóricos de esfuerzo y factor de seguridad, coinciden con los valores arrojados por la simulación, lo que demuestra que las condiciones de contorno son las adecuadas y por lo tanto los resultados que arroja la simulación y las decisiones que se están tomando con base a ello son totalmente confiables.