

**ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA CORROSIÓN TIPO PICADURA EN LOS
ESFUERZOS DE UNA TUBERÍA PARA TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS
UTILIZANDO EL SOFTWARE DE SIMULACIÓN ANSYS**

**SANDRA LILIANA MEDINA BUELVAS
WILMER MAURICIO SALAMANCA HERNÁNDEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2017

**ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA CORROSIÓN TIPO PICADURA EN LOS
ESFUERZOS DE UNA TUBERÍA PARA TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS
UTILIZANDO EL SOFTWARE DE SIMULACIÓN ANSYS**

**SANDRA LILIANA MEDINA BUELVAS
WILMER MAURICIO SALAMANCA HERNÁNDEZ**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

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

Codirector

**ALBERTO DAVID PERTUZ COMAS
Ingeniero Mecánico, Ph.D**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA

A Dios por guiarme a lo largo de este camino, por darme fortaleza y salud para culminar esta meta.

A mis padres, por su amor y apoyo incondicional, quienes fueron, son y siempre serán mi inspiración para seguir adelante. Éste logro es para ustedes.

A mis Hermanas por creer y cuidar de mí a cada momento.

A Alberth quien me apoyó y alentó a continuar en los momentos que parecían difíciles.

A todas aquellas personas que estuvieron a mi lado a lo largo de este camino y me ayudaron a cumplir este logro.

Sandra Liliana Medina Buelvas

DEDICATORIA

A mis padres Helena Hernández y Jaime Salamanca por todo su apoyo a lo largo de mi vida, por creer en mis sueños y ofrecer una mano para poder escalarlos, su paciencia y comprensión fueron inigualables. A mi abuela Elsa Hernández y mi tía Mery Hernández por esos pequeños billetes que volvían grande mi día.

A mi amigo Daniel Sarmiento por sus palabras reconfortantes y el préstamo de su computador cuando todo parecía imposible de finalizar.

Por último, una mención especial a Sandra Lizeth Durán Estévez, compañera y amiga fiel desde el principio de carrera, su apoyo a lo largo de cada semestre bueno o malo representó un punto de inflexión en mi vida, su gran inteligencia y sencillez dieron en mí un referente claro de lo que podría llegar a ser con disciplina y esfuerzo. Su incondicionalidad en todo momento y sus más sinceras palabras dulces y fuertes sobre mí, fueron los cimientos para no desfallecer.

Gracias a ti, “coneja”, por cada minuto desglosando el conocimiento, cogiendo del aire y trayendo a tierra lo que para mí se veía tan alto e incomprensible; este proyecto simboliza solo una pequeña extensión de tu gran influencia en mí en la ingeniería mecánica. Hoy y siempre en algún lugar en el tiempo, Gracias.

Wilmer Mauricio Salamanca Hernández

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos especiales a los ingenieros Oscar Julián Pereira Fernández, Carlos Hernando Patiño Villamizar y Héctor Fabián Reyes por su amable apoyo en cada una de las fases de la investigación, su cortesía, conocimiento y profesionalismo son muestra del gran talento que posee la industria Colombiana, también al grupo de investigación en supercomputación a cargo del ingeniero Gilberto, su interés y gusto por los retos permitieron la vinculación de los software de ingeniería mecánica con la supercomputadora de la universidad, recurso disponible para toda la comunidad

A nuestro colega Rafael Rondón por compartir sus grandes conocimientos en CAD cuando hasta el más sencillo problema nos agobiaba; a los Ingenieros Edson Meneses, Sergio Ardila y Juan León por la atención brindada en las salas de cómputo de maestría. A Daniel Aguilar Sarmiento por el préstamo de su computador personal en las arduas noches de simulación.

Finalmente Agradecimientos fraternos a nuestro Director de tesis, Octavio Andrés González Estrada y el Co-director Alberto David Pertuz Comas por la paciencia, guía y conocimiento brindado a lo largo de toda la investigación.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	16
1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	21
2. JUSTIFICACIÓN.....	22
3. OBJETIVOS.....	24
3.1 OBJETIVO GENERAL	24
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	24
4. CORROSIÓN EN TUBERÍAS	25
5. ESFUERZOS EN TUBERÍAS	29
6. ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN TUBERÍA DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS.....	32
6.1 MODELO ELÁSTICO DE LA TUBERÍA.....	32
6.2 MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)	33
7. ANÁLISIS EXPERIMENTAL	36
8. BANCO DE INFORMACIÓN.....	37
8.1 MODELO ANALÍTICO DE ESFUERZOS EN TUBERÍA SANA.....	38
8.2 MODELO NUMÉRICO DE ESFUERZOS EN TUBERÍA SANA.....	39
8.2.1 Caracterización del modelo.....	39
8.2.2 Consideraciones generales del modelo numérico	40
8.2.3 Mallado y condiciones de contorno.....	40

8.3 ANÁLISIS NUMÉRICO DE ESFUERZOS EN TUBERÍA AFECTADA	41
8.3.1 Condiciones de contorno	44
8.3.2 Tamaño de malla	44
8.4 VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LA PICADURA...	46
8.5 NORMA API 579 FITNESS FOR SERVICE.....	49
9. RESULTADOS.....	52
10. CONCLUSIONES	62
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
BIBLIOGRAFÍA.....	69
ANEXOS.....	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo del análisis experimental.....	36
Figura 2. Dos secciones de tubería afectada por corrosión tipo picadura.	37
Figura 3. Condiciones de contorno en tubería	41
Figura 4. Modelo numérico para comprobar la configuración de picado más crítica.	42
Figura 5. Distribución de la picadura rectangular.....	43
Figura 6. Distribución de la picadura elíptica.	44
Figura 7. Gráfica de convergencia para la región elíptica simétrica M1.....	46
Figura 8. Representación de la picadura para los modelos 1, 2 y 3	48
Figura 9. Representación de la picadura para los modelos 4, 5 y 6	48
Figura 10. Representación de la picadura para los modelos 7,8 y 9	49
Figura 11. Representación de la picadura para los modelos 10, 11, y 12.	49
Figura 12. Gráfico de esfuerzo equivalente para las muestras 1 y 2 rectangular y elíptica.	53
Figura 13. Ángulo que se forma entre la línea que une los centros de dos picaduras y la horizontal.	54
Figura 14. Esfuerzo circunferencial donde se muestra la compresión en la muestra elíptica simétrica 2.	55
Figura 15. Gráfico de tendencia de la variación del diámetro mayor de las picaduras	56
Figura 16. Deformación de los modelos numéricos a) 7 y b) 8 y c) 9.	57
Figura 17. Comparación del esfuerzo circunferencial en los modelos 13 y 15	58
Figura 18. Comparación del esfuerzo radial en los modelos 13 y 15.....	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades mecánicas del acero API 5L X56.	38
Tabla 2. Especificaciones geométricas de la picadura.	38
Tabla 3. Especificaciones geométricas de la tubería.	39
Tabla 4. Parámetros geométricos de la tubería.	40
Tabla 5. Parámetros promedio de las mallas en tubería afectada.	45
Tabla 6. Variación de los parámetros geométricos de la picadura.	47
Tabla 7. Parámetros requeridos por la norma para iniciar la evaluación.	50
Tabla 8. Comparación de los esfuerzos resultantes en la simulación con las ecuaciones analíticas.	52
Tabla 9. Resultados de los esfuerzos máximos para las muestras M1 y M2.	53
Tabla 10. Esfuerzos máximos de parámetros geométricos variables.	55
Tabla 11. Comparación entre los resultados obtenidos con la norma y el análisis numérico.	60

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Cálculos del nivel 2 de evaluación para tuberías con corrosión tipo picadura según la norma API 579 RP Fitness For Service.	70
Anexo B. Convergencias	77

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA CORROSIÓN TIPO PICADURA EN LOS ESFUERZOS DE UNA TUBERÍA PARA TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS UTILIZANDO EL SOFTWARE DE SIMULACIÓN ANSYS .

AUTOR: SANDRA LILIANA MEDINA BUELVAS
WILMER MAURICIO SALAMANCA HERNÁNDEZ**

PALABRAS CLAVE: Corrosión, Picadura, Tubería, Hidrocarburos, Ansys, NORMA API 579 Fitness for Service.

DESCRIPCIÓN:

En este trabajo se analiza la variación de los esfuerzos generados en una tubería para transporte de hidrocarburos cuando presenta pequeños agujeros en su superficie, es decir, cuando se encuentra afectada por corrosión tipo picadura. Éste es uno de los ataques corrosivos localizados que genera un deterioro considerable en el material debido a que su forma de propagación es de difícil detección. El presente análisis se hace en el rango elástico del material debido a que las tuberías de transporte de hidrocarburos deben ser operativas con corrosión. En primer lugar, se realiza el modelo de una tubería sana por medio de elementos finitos, y se validan los resultados a través de fórmulas analíticas. Posteriormente, se consideran dos muestras de casos reales de tubería que fallaron en operación debido a corrosión, y se realiza un modelo numérico para determinar el comportamiento elástico de la tubería bajo diferentes escenarios de picados (forma rectangular y elíptica), además se analiza el comportamiento de los esfuerzos en la tubería corroída cuando se varían las condiciones geométricas de la picadura con el fin de jerarquizar las características geométricas que producen mayores tensiones mecánicas. Finalmente, se comparan los resultados de los modelos con los obtenidos por medio del nivel 2 de evaluación para tuberías corroídas por picadura de la norma API 579 Fitness For Service.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Dr. Octavio Andrés González Estrada, PhD, Ingeniero Mecánico. Codirector: Dr. Alberto David Pertuz Comas, PhD, Ingeniero Mecánico.

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF THE PITTING CORROSION EFFECT IN THE STRESSES OF A PIPELINE FOR TRANSPORTING HYDROCARBONS USING THE SOFTWARE ANSYS^{*}.

AUTHORS: SANDRA LILIANA MEDINA BUELVAS
WILMER MAURICIO SALAMANCA HERNÁNDEZ^{**}

KEY WORDS: Corrosion, Pitting, Pipe, Hydrocarbons, ANSYS, Standard API 579 Fitness For Service.

DESCRIPTION:

In this work we analyse and vary the stresses generated in a pipeline used for the transport of hydrocarbons when it has small holes in its surface, that is, when it is affected by pitting corrosion. This is one of the localized corrosive attacks that cause considerable deterioration in the material because its form of propagation is difficult to detect. The present analysis is done in the elastic range of the material because the hydrocarbon transport pipelines must be operative with corrosion. First, we perform the simulation of a healthy pipeline using the software Ansys, and validate the results using analytical equations. Subsequently, two samples of pipe cases that failed in operation due to corrosion are considered, and a numerical model is performed to determine the elastic behaviour of the pipe under different pitted scenarios (rectangular and elliptical). In addition, the behaviour of the stresses is investigated in the corroded pipe when the geometric conditions of the pit change with the purpose of hierarchizing the geometric characteristics that produce greater mechanical tensions. Finally, we compare the results of the models with those obtained by the level 2 assessment for corroded pipes under pitting using the standard API 579 Fitness For Service.

^{*} Bachelor Thesis

^{**} Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Advisor: Dr. Octavio Andrés González Estrada, MEng, PhD. Coadvisor: Dr. Alberto David Pertuz Comas, MEng, PhD.

INTRODUCCIÓN

En cualquier sistema de ingeniería, el cálculo de las tensiones mecánicas es inherente al buen desarrollo en la fase de diseño. Los esfuerzos demuestran el comportamiento del sistema bajo múltiples condiciones. Todo material bajo cargas de cualquier tipo presenta una respuesta mecánica, la cual puede variar debido a procesos inducidos como, p.e., algún tratamiento térmico. Asimismo, estas variaciones se pueden presentar de forma natural y negativa, como es el caso de procesos como la corrosión y erosión.

La corrosión es el deterioro de un material a causa de procesos electroquímicos por el contacto con el medio ambiente, su velocidad e intensidad dependen de factores como: temperatura, concentración de los reactivos y productos, esfuerzos mecánicos del material, erosión, entre otros [1], [2]. Su estudio se ha vuelto de vital importancia debido a las grandes pérdidas económicas (alrededor de 26 mil millones en Colombia que representan el 4% del PIB, y 276 billones de dólares en USA [3]), especialmente en la industria del petróleo.

En sistemas de gran complejidad, como los de transporte de hidrocarburos, es necesario realizar un seguimiento para evitar daños en servicio y accidentes fatales a causa de la corrosión, como lo plantea la norma API Fitness for Service [4] para tuberías. Múltiples investigaciones se han llevado a cabo para analizar este fenómeno. Shekari et al. [5] compararon diferentes metodologías Fitness for Service (FFS) y proponen una nueva evaluación FFS para predecir el tiempo de fallo de un componente afectado por corrosión por picadura. Asimismo, dicha metodología incluye un estimativo de la densidad promedio de los orificios, profundidad y presión máxima permisible del componente en un periodo de tiempo determinado. Sheng et al. [6] realizaron la simulación por corrosión por picadura

en probetas normalizadas de acero Q235, con el fin de analizar su efecto sobre las propiedades de tracción del material. Los resultados revelaron que la carga de rotura no se vio afectada en gran manera por la forma, profundidad y la distribución de los huecos, mientras que sí se observó correlación con la carga de fluencia. Calderón Hernández et al. [7] estudiaron la relación a la resistencia de la corrosión en aceros inoxidable en adición de manganeso en solución sólida, demostrando un efecto negativo contra la corrosión, mientras que determinadas proporciones de carbono, nitrógeno, manganeso, cobre y cobalto permitían obtener las propiedades mecánicas necesarias.

Los aceros de la serie API 5L son usados en tuberías de transporte por su alta resistencia a la corrosión, especialmente para gases amargos [8]. Estas tuberías de acero al carbono se corroen principalmente de forma interna debido al transporte de sus fluidos y sus picados pasan desapercibidos [9]. En algunas investigaciones como la de Choi et al. [10] se realizaron simulaciones en tuberías de acero de gas corroída de la familia API 5L, mecanizando los huecos y aplicando ensayos de rotura, esto permitió definir un criterio de falla al llevar el material a la fractura. La norma API fitness for service [4] aclara que los picados pueden tener diversas formas, rectangular, elíptica, e irregular. En la corrosión por picadura una capa protectora de óxido cubre los huecos generalmente, haciendo que este tipo de corrosión sea de difícil detección y prevención, es además extremadamente rápida y se considera uno de los tipos de corrosión más perjudiciales, penetrando el material completamente sin dejar un gran rastro de pérdida de material; sus esfuerzos localizados en los picados pueden ser inicio para otros tipos de corrosión [9].

Una de las formas para obtener el valor máximo de picado es con la norma técnica NACE RP0775-2005, donde se relaciona la máxima profundidad de picado con el

tiempo de exposición, usada por Ballesteros et al. [11] en el estudio de la evaluación de corrosión por picado de un acero inoxidable, Rodríguez et al. [12] estudiaron la detección de corrosión tipo picadura en acero inoxidable usando ultrasonidos, un método que se aplica en nuestros días en la industria del petróleo para la detección de daño; así mismo Chen et al. [13] investigaron como afecta la forma como está ubicado el defecto por corrosión (longitudinal o circunferencialmente) a la presión de falla en una tubería de acero X80, mediante elementos finitos no lineales. Los resultados numéricos indicaron que la presión de falla se ve afectada por la separación entre los defectos de corrosión. También Mejía et al [14] evaluaron corrosión tipo picadura usando ruido electroquímico en tubería de acero al carbono, estos tres métodos de análisis, numérico, de ultrasonido y ruido electroquímico demuestran algunas de las posibilidades para el cálculo de daño debido a la corrosión.

El uso de nuevas tecnologías como los materiales compuestos de fibra reforzada, proporcionan una nueva solución contra la corrosión en tuberías. Estrada et al [15], estudiaron el análisis de integridad estructural de tuberías de material compuesto para el transporte de hidrocarburos por elementos finitos.

En esta investigación se estudió la generación de esfuerzos por causa de la corrosión tipo picadura en tubería de transporte de hidrocarburos de material acero API 5L X56. Se analizó la relación de los esfuerzos respecto a la corrosión tipo picadura en el rango elástico, debido a que las tuberías de transporte de hidrocarburos deben ser operativas con corrosión, y no deben presentar daños dentro del rango plástico del material.

Se consideraron dos muestras de casos reales de tubería que fallaron en operación debido a corrosión. En la sección 8.1 se especificó cada muestra, con

sus respectivas propiedades mecánicas y características geométricas del área picada.

En la primera parte en el apartado 8.3 se plantea un modelo de tubería sin picadura, con el objetivo de hallar sus tensiones mecánicas y tener un punto de comparación con los modelos con picadura analizados. El cálculo de las tensiones mecánicas en el modelo sin picadura se dividió en un análisis teórico, donde se usaron las fórmulas de criterio de falla y esfuerzos para tuberías con presión interna [16], y un análisis numérico donde con elementos finitos se determinaron los respectivos esfuerzos.

En la sección 8.4 se describe el experimento de los dos modelos de tubería con picadura, donde se simula el área de la picadura en diferentes tipos de posible distribución de los huecos y forma. La forma del área picada fue estudiada en esta investigación, donde se buscó la más crítica. El análisis numérico de los modelos con picadura permitió determinar el comportamiento elástico de la tubería bajo diferentes escenarios de picados. En el análisis numérico planteado por elementos finitos, se realizaron los mismos tipos de prueba para cada muestra, esperando una relación en los resultados de cada una.

Al finalizar la sección 8.5 se realizó una segunda serie de simulaciones totalmente independientes a las muestras reales. Se variaron las especificaciones geométricas de los huecos y el área de la picadura, con el fin de jerarquizar y relacionar las características geométricas que producen mayores tensiones mecánicas, cabe resaltar que la investigación presente no solo buscó la relación de las tensiones mecánicas con la corrosión tipo picadura, sino también el adecuado criterio de falla y método de análisis.

En la última parte de la investigación (sección 8.6) se especificó el procedimiento usado con la norma API FITNESS FOR SERVICE para los cálculos de las tensiones mecánicas permisibles, y se presentó un comparativo y análisis de resultados con los modelos numéricos y analíticos. La investigación realizada agrupa algunos tipos de metodología para el cálculo de esfuerzos en tuberías de transporte de hidrocarburos corroídas por picadura y presenta respuestas sobre las causas de la mayor criticidad.

1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Uno de los principales problemas en la industria de hidrocarburos es la seguridad a la hora de almacenar, transportar y manipular productos carburantes, por consiguiente es de vital importancia adoptar medidas para identificar peligros y así minimizar el riesgo de accidentes.

Se estima que los gastos atribuidos a los daños por corrosión representan entre el 3 y el 5 por ciento del producto interno bruto (PIB) de los países industrializados. Solamente hablando del acero, de cada diez toneladas fabricadas por año se pierden dos y media por corrosión [17].

Por lo tanto es pertinente realizar un estudio adecuado para la corrosión, en este caso tipo picadura, con el fin de prevenir el número de incidencias ocasionadas por ésta, porque además de las pérdidas económicas acarreadas, también se afecta el medio ambiente (contaminación de las aguas subterráneas, suelos, daños a flora y fauna, cuerpos de agua etc.), y a un número significativo de seres humanos.

2. JUSTIFICACIÓN

Actualmente existen una serie de normas que se deben cumplir al momento de realizar un diseño; y dentro de ellas, para un sistema de tuberías, se tiene en cuenta el código ASME B31 que posee varias secciones, dependiendo del tipo de instalación de tubería. En el caso de transporte de hidrocarburos deben tenerse en cuenta las secciones cuatro (4) y ocho (8) de este código, que considera como criterio de diseño para este tipo de tuberías, el control y la resistencia a la corrosión.

De igual manera, para ejecutar la evaluación de una tubería que ha estado funcionando por un tiempo determinado se deben realizar ciertos estudios para determinar si la tubería puede seguir operando sin poner en riesgo a los trabajadores y/o el entorno. La norma API RP 579 FITNESS FOR SERVICE es utilizada para diagnosticar el estado de la tubería por medio de tres niveles de evaluación: Cálculos simples e inspección, Cálculos más complejos pero realizables mediante una hoja de cálculo, y finalmente simulación de la tubería por medio del análisis de elementos finitos.

En la industria química la corrosión localizada es la causa principal de fallos en servicio, y se estima que da origen a por lo menos el 90% de los daños ocasionados por la corrosión [18]. La picadura es uno de los ataques corrosivos localizados que genera un deterioro considerable que debido a su forma de propagación es de difícil detección.

Con base en lo anterior, este proyecto es factible porque la picadura es un tipo de corrosión, que a pesar de estar centrada en un área muy pequeña en comparación

con el resto de la tubería, puede causar grandes daños si atraviesa su espesor y provoca un escape, que de no ser detectado a tiempo podría acabar en un incidente desafortunado. En Colombia, existen pocos estudios dedicados al daño generado por la corrosión tipo picadura mediante un software de simulación, por lo tanto, con este trabajo, se pretende proporcionar a la industria más información concerniente a este tipo de fenómeno, realizando un estudio y posteriormente un análisis de esfuerzos y deformaciones con el software de simulación ANSYS.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Simular a través de elementos finitos la corrosión tipo picadura y su efecto en una tubería de transporte de hidrocarburos para el análisis de los estados de esfuerzo y deformación.

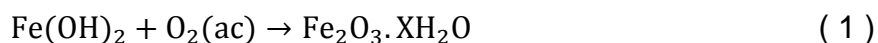
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar a través de la simulación con el software ANSYS, el tipo de picadura, rectangular o elíptica, que ocasiona más daño en un tramo de tubería de acero API 5L X56.
- Establecer mediante la simulación con el software ANSYS cómo cambian los esfuerzos y deformaciones en un tramo de tubería de acero API 5L X56 cuando se varían los parámetros geométricos (largo, ancho, profundidad) de la picadura previamente identificada, con el fin de realizar una tabla comparativa y analizar dichos resultados.
- Comparar los resultados obtenidos mediante fórmulas analíticas globales del esfuerzo circunferencial, longitudinal y equivalente, según el nivel dos de evaluación para tuberías corroídas por picadura, de la norma API RP 579 FITNESS FOR SERVICE, con los resultados numéricos de la simulación.

4. CORROSIÓN EN TUBERÍAS

La corrosión es el deterioro de un material a causa de procesos electroquímicos por el contacto con el medio ambiente, su velocidad e intensidad dependen de factores como: temperatura, acidez (PH), esfuerzos mecánicos del material, poder oxidante, entre otros [1]. Su estudio se ha vuelto de vital importancia debido a las grandes pérdidas económicas en la industria. En los países industrializados los efectos de la corrosión sobre instalaciones y equipos industriales, ocasionan pérdidas anuales significativas valoradas en un 3% del PIB [19]. Gerhardus et al. citado por Nuhi et al. [1] afirma que el “coste directo anual de la corrosión, en la industria petrolera estadounidense excede \$5.1 mil millones por año”, igualmente en Colombia se pierden alrededor de 26 mil millones de pesos anuales [3].

En el proceso de oxidación de los metales la superficie trabaja como un ánodo (pérdida de electrones), siendo este el elemento oxidante y el medio circundante (agua y aire), como cátodo (ganancia de electrones). Para el hierro por ejemplo, luego de sucesivas oxidaciones, en la reacción final (1) se obtienen distintos óxidos hidratados llamados comúnmente “herrumbre”.



Cada tipo de metal se corroe de distinta forma dependiendo de las variables de su ambiente y sus propiedades. Comúnmente para el control de la corrosión, se utilizan materiales resistentes a la misma en un ambiente específico, bajo reglas que normalmente son aplicables cuando se eligen metales y aleaciones: para condiciones reductoras y no oxidantes como los ácidos sin aire y las soluciones acuosas, se recurre a menudo a aleaciones de níquel y cobre, en condiciones

oxidantes, se emplean aleaciones que contienen cromo y en condiciones de oxidación extremadamente fuertes, es común que se utilicen titanio y sus aleaciones [2].

De acuerdo al aspecto del metal corroído se evidencia el tipo de corrosión que presenta, aunque muchas veces el estado de una muestra de metal es el resultado de la interacción de varios de ellos. La corrosión de acuerdo a sus características se clasifica en: ataque corrosivo general, corrosión galvánica, corrosión por hendiduras, corrosión intergranular, corrosión por erosión, corrosión bajo tensión, corrosión por desgaste, daño por cavitación y corrosión por picadura.

La corrosión por picadura o picado, objeto de análisis en el presente trabajo, es un tipo de corrosión localizada por la cual se producen cavidades u orificios en el material. La picadura se considera más peligrosa que la corrosión uniforme porque es más difícil de detectar y predecir, comúnmente los picados están recubiertos por el material corroído y la profundidad del daño pasa desapercibida. Las regiones alrededor de la picadura suelen mantenerse intactas. Muchas veces la cercanía entre picados da la sensación de una superficie totalmente corroída y rugosa ocasionando que se ignore el deterioro interno, los daños por picadura suelen ser catastróficos e inesperados y puede conducir al fracaso de todo un sistema de ingeniería cuando el material ha sido totalmente perforado.

La picadura se genera a causa de distintos escenarios y va ligada a otros tipos de corrosión, la corrosión bajo aislamiento (CUI) es uno de los tipos de corrosión localizada que produce picadura, se presenta principalmente en tuberías, tanques y componentes estructurales de cualquier tipo, que están p.e. en contacto con aguas estancadas. Un mal diseño en el aislamiento usado en la tubería puede generar estancamiento de partículas oxidantes y acelerar el proceso de corrosión,

la temperatura, el ambiente húmedo, las lluvias y cloruros de un ambiente bastante salino, como en la industria a nivel del mar, son los factores más críticos [20].

Los sistemas de tubería con operaciones cíclicas en temperaturas son también propensos a la picadura, un ejemplo son las bajas temperaturas que se pueden presentar en las noches por debajo del punto de rocío, ocasionando una permanente humedad sobre los recubrimientos superficiales, también ésta se vuelve más severa en el metal cuando se encuentra entre el punto de ebullición estándar (100° a 121°), debido a que por encima de ésta temperatura la corrosión se empieza a extender.

Para la mitigación y prevención de la corrosión localizada siempre es apropiado usar pinturas y recubrimientos anticorrosivos y el mantenimiento de los aislamientos evitando el ingreso de humedad. La selección de los materiales de aislamiento es muy importante, la fibra de vidrio usada como aislamiento térmico mantendrá el sistema con menos humedad en las tuberías que la lana mineral y es potencialmente menos corrosiva [20].

El plan de inspección para CUI debe ser estructurado en un plan de respuesta de análisis predictivo y preventivo, donde sus procedimientos puedan ser más invasivos y obtener resultados más concretos. En el plan de inspección se deben considerar la temperatura de operación, la condición y hoja de vida de los aislamientos y recubrimientos. Adicionalmente se puede agregar a una inspección física del equipo con personal calificado buscando los puntos críticos como zonas con macillas, soldaduras, sellos y de drenaje donde puede haber penetrado la humedad y el óxido. Los métodos más especializados incluyen pruebas de ultrasonidos para el espesor de la tubería, rayos x en tiempo real, técnicas

radiantes como "Neutron backscatter", inspección granular del material con corrientes torbellino, parásitas o también llamada corriente de Foucault, método que puede ser automatizado con robots móviles sobre los sistemas de tubería, y por último pruebas de termografía [20].

Todas las discontinuidades geométricas generadas por la picadura, causan un aumento en las tensiones locales del material y para su estimación se pueden emplear métodos numéricos como el análisis de elementos finitos (FEA) [21].

Abdalla et al. [22] estudiaron la distribución de tensiones en defectos aislados de corrosión por picadura a través de elementos finitos en un tubo API-5L-X60 y concluyeron que la tensión máxima aumenta con el aumento del diámetro de la tubería y con la profundidad del hueco. En ese mismo sentido Pidaparti y Patel [23] investigaron, mediante elementos finitos, la correlación entre picados y tensiones en aleaciones de aluminio 2024-T3 en tiempos diferentes (30 y 60 minutos, bajo una solución de electrolito de NaCl 3 M y una tensión aplicada de -0,63 mV). Como resultado, hallaron que las tensiones aumentaron un 80% dentro de los primeros 30 min de corrosión y luego el aumento fue de aproximadamente 6% de 30 min a 60 min hasta alcanzar una meseta y concluyeron que a partir de estos esfuerzos es posible estimar la iniciación de grietas y con ella estimar la vida por fallo en el material.

Debido a que la corrosión afecta en gran medida la integridad de muchos materiales y estructuras en diferentes campos de la ingeniería, es necesario predecir y comprender los daños que ocasiona, para garantizar por más tiempo la integridad estructural de las aleaciones metálicas [21].

5. ESFUERZOS EN TUBERÍAS

El cálculo de los esfuerzos triaxiales y sus deformaciones en el régimen elasto-plástico de un material dúctil, permite un análisis discretizado de las fallas en la tubería donde se pueden generar esfuerzos por varias causas: imperfecciones en el montaje, tiempo de operación, ubicación, componentes y cargas adicionales.

En el diseño de tuberías es necesaria la correcta distinción de los tipos de carga que realmente generan cambios significativos en los esfuerzos. Es labor del ingeniero de diseño despreciar ciertas fuerzas para la simplificación del problema. En un sistema de tubería las cargas adicionales se pueden dividir en 3 tipos: Cargas por peso, dinámicas y térmicas.

La carga adicional por peso, hace referencia al peso de tubería, las fuerzas externas aplicadas (tubería enterrada), aislamientos y los accesorios que componen el sistema (bridas, codos, válvulas, soportes entre otros). Igualmente al peso del fluido y la presión de flujo que este ejerce a través de su trayectoria.

Las cargas dinámicas por su parte, son externas y principalmente se deben a las condiciones atmosféricas como cargas sísmicas, efectos del viento, y a los cambios del fluido en la tubería que ocasionan vibraciones en el sistema (descargas, caídas bruscas de presión y golpes de ariete). Estas cargas son usadas para análisis de fatiga en la tubería.

Así mismo, las cargas generadas por las variaciones de temperaturas del fluido, por sus condiciones de operación y el medio circundante, constituyen las cargas térmicas y se reflejan en dilataciones o contracciones en la tubería.

Los esfuerzos triaxiales muestran el comportamiento mecánico de cualquier tipo de tubería con su respectivo montaje.. En el análisis de esfuerzos las tuberías se clasifican en tuberías de pared delgada y gruesa, tal denominación depende de la relación del radio medio de la tubería y su espesor. Se considera tubería de pared delgada cuando el cociente es mayor o igual a diez y en caso de ser menor es catalogada como gruesa.

En la literatura, existen dos métodos analíticos para estudiar los esfuerzos de recipientes cilíndricos presurizados debido a la presión interna. El método de pared fina o delgada (2)-(4), utilizado comúnmente debido a su enfoque sencillo, y la formulación de Lamé (5)-(7), basada en ecuaciones diferenciales de desplazamiento y aplicable a recipientes de pared gruesa [16], [24]–[26].

$$\sigma_{\theta} = \frac{P_i r}{t} \quad (2)$$

$$\sigma_L = \frac{\nu P_i r}{t} \quad (3)$$

$$\sigma_r = 0 \quad (4)$$

En las ecuaciones (2) a (7), P_i es igual a la presión interna, t el espesor, r_m , r_o y r_i son el radio medio, interior y exterior de la tubería respectivamente, y ν es el coeficiente de Poisson, cuyo rango se encuentra entre 0.25 y 0.4 en aceros.

$$\sigma_{\theta} = P_i \frac{d_o^2 + d_i^2}{d_o^2 - d_i^2} = P_i \frac{r_o^2 + r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad (5)$$

$$\sigma_1 = v(\sigma_{\theta} + \sigma_r) \quad (6)$$

$$\sigma_r = -P_i \quad (7)$$

Las fallas en los sistemas de tubería deben estar muy bien controladas ya que sus daños pueden ser devastadores, por esta razón, su diseño está enfocado en una vida larga de servicio. Para el análisis general de una tubería se calculan los esfuerzos y el pronóstico de la falla, el cual se realiza a través de las diferentes teorías tales como la teoría de esfuerzo cortante y la de máxima energía de distorsión (von Mises), esta última es la más adecuada para el estudio de tuberías de materiales dúctiles, debido a su simplificación de cálculo y sus parámetros conservadores. Su ecuación está dada por la expresión (8) .

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]} \quad (8)$$

Donde σ_1, σ_2 y σ_3 son los esfuerzos principales para el caso de tuberías a presión interna (esfuerzo circunferencial, longitudinal y radial respectivamente).

6. ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN TUBERÍA DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS

6.1 MODELO ELÁSTICO DE LA TUBERÍA

Para el cálculo de las tensiones mecánicas, la tubería se desarrollará como un problema elástico donde su material, acero, se analizará en esfuerzos representados en vectores como $\boldsymbol{\sigma} = \{\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}\}^T$, las deformaciones como $\boldsymbol{\varepsilon}$ y los desplazamientos \mathbf{u} , adicional a esto se añadirá al problema las cargas volumétricas (\mathbf{b}), las tracciones de Neumann (\mathbf{t}) y las condiciones de Dirichlet ($\boldsymbol{\mathfrak{u}}$) [15]. La solución del modelo elástico se resume en cómo encontrar los desplazamientos \mathbf{u} cumpliéndose:

$$\mathbf{L}^T \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = 0 \text{ en } \Omega \quad (9)$$

$$\mathbf{G} \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{t} \text{ en } \Gamma_N \quad (10)$$

$$\mathbf{u} = \boldsymbol{\mathfrak{u}} \text{ en } \Gamma_D \quad (11)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) = \mathbf{L} \mathbf{u} \quad (12)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) \quad (13)$$

Los valores de \mathbf{L} y \mathbf{G} son operadores diferenciales que representan las tensiones para el equilibrio en el contorno del modelo, el valor \mathbf{C} es la matriz completa de la elasticidad del acero.

La elasticidad de la tubería se puede expresar de forma variable de la forma:

Encontrar $\mathbf{u} \in V$ tal que $\forall \mathbf{v} \in V$:

$$\int_{\Omega} \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{v})^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{v}^T \mathbf{b} d\Omega + \int_{\Gamma_N} \mathbf{v}^T \mathbf{t} d\Gamma, \quad (14)$$

Donde $V = \{\mathbf{v} | \mathbf{v} \in [\mathbf{H}^1(\Omega)]^2, \mathbf{v}_\Gamma = \mathbf{0}\}$

El acero de la tubería es un material isotrópico, esto garantiza un comportamiento uniforme en las respectivas direcciones de los planos de simetría ortogonales del modelo.

6.2 MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

Para el cálculo de elementos de ingeniería muy complejos, el método de los elementos finitos proporciona una idealización numérica del modelo real, esto permite la transformación de cualquier sistema físico, independiente de su dificultad, a un sistema matemático basado en la discretización de una zona o punto llamado nodo, el cual se compone de un número finito de ecuaciones que describen el sistema, y son adyacentes a sus pares. La forma en que se encuentran unidos los nodos constituye un elemento. En el momento de realizar un análisis por MEF, es necesario conocer el tipo de elemento adecuado para el componente a analizar, y así poder obtener resultados satisfactorios.

En todas las simulaciones realizadas en la investigación, se usaron elementos finitos de forma triangular, definidos por 3 nodos locales. Los desplazamientos \mathbf{u} en cualquier punto del elemento se pueden representar de forma vectorial de la siguiente manera, Siendo \mathbf{N} el número de nodos para cada elemento [27]:

$$\mathbf{u} \approx \hat{\mathbf{u}} = \sum_a \mathbf{N}_a \tilde{\mathbf{u}}_a^e = [\mathbf{N}_1, \mathbf{N}_2 \dots] \begin{Bmatrix} \tilde{u}_1 \\ \tilde{u}_2 \\ \vdots \end{Bmatrix} = \mathbf{N} \tilde{\mathbf{u}}^e \quad (15)$$

Las tensiones en cada punto del elemento son resultado de la relación:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{S} \mathbf{u} \quad (16)$$

Donde \mathbf{S} es el operador diferencial lineal adecuado para el caso, en conjunto con la ecuación (15). La ecuación (16) puede ser aproximada de la siguiente manera, donde \mathbf{B} es la matriz que representa el modelo elástico

$$\boldsymbol{\varepsilon} \approx \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbf{S} \mathbf{u} \quad (17)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{S} \mathbf{N} \quad (18)$$

Los esfuerzos en cada elemento están dados por la siguiente ecuación, y muestra la relación lineal entre esfuerzo-deformación. \mathbf{D} es la matriz de las propiedades mecánicas del material y $\boldsymbol{\varepsilon}_0$, $\boldsymbol{\sigma}_0$ las condiciones iniciales de esfuerzo y deformación del caso, p.e cambios de temperatura.

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}(\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_0) + \boldsymbol{\sigma}_0 \quad (19)$$

Las fuerzas equivalentes \mathbf{q} en los nodos son semejantes a los esfuerzos en los límites del elemento, y las fuerzas de cuerpo distribuidas \mathbf{b} actúan sobre una unidad de volumen en el material sobre el mismo elemento. La expresión combinada para esfuerzo - deformación y fuerzas equivalentes es:

$$\mathbf{q} = \mathbf{K}^e \tilde{\mathbf{u}}^e + \mathbf{f}^e \quad (20)$$

Donde $\mathbf{K} = \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} \Delta t$ y $\mathbf{f}^e = \mathbf{B}^T (\boldsymbol{\sigma}_0 - \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}_0) \Delta t$. \mathbf{B}^T es la matriz del modelo elástico para un número finito de elementos y Δt es el espesor constante del plano de tensión.

El concepto de fuerza nodal se puede generalizar a una región completa de elementos y el proceso de cálculo se puede aplicar directamente a “todo” un continuo. La primera ecuación es aplicable también a toda la estructura de la siguiente forma:

$$\mathbf{u} = \tilde{\mathbf{N}}\tilde{\mathbf{u}} \quad (21)$$

$$\delta\mathbf{u} = \tilde{\mathbf{N}}\delta\tilde{\mathbf{u}} \quad (22)$$

Los termino $\tilde{\mathbf{u}}$ y $\delta\tilde{\mathbf{u}}$ son la lista completa de los puntos nodales de la región.

$$\tilde{\mathbf{N}}_a = \sum_e \mathbf{N}_a^e \quad (23)$$

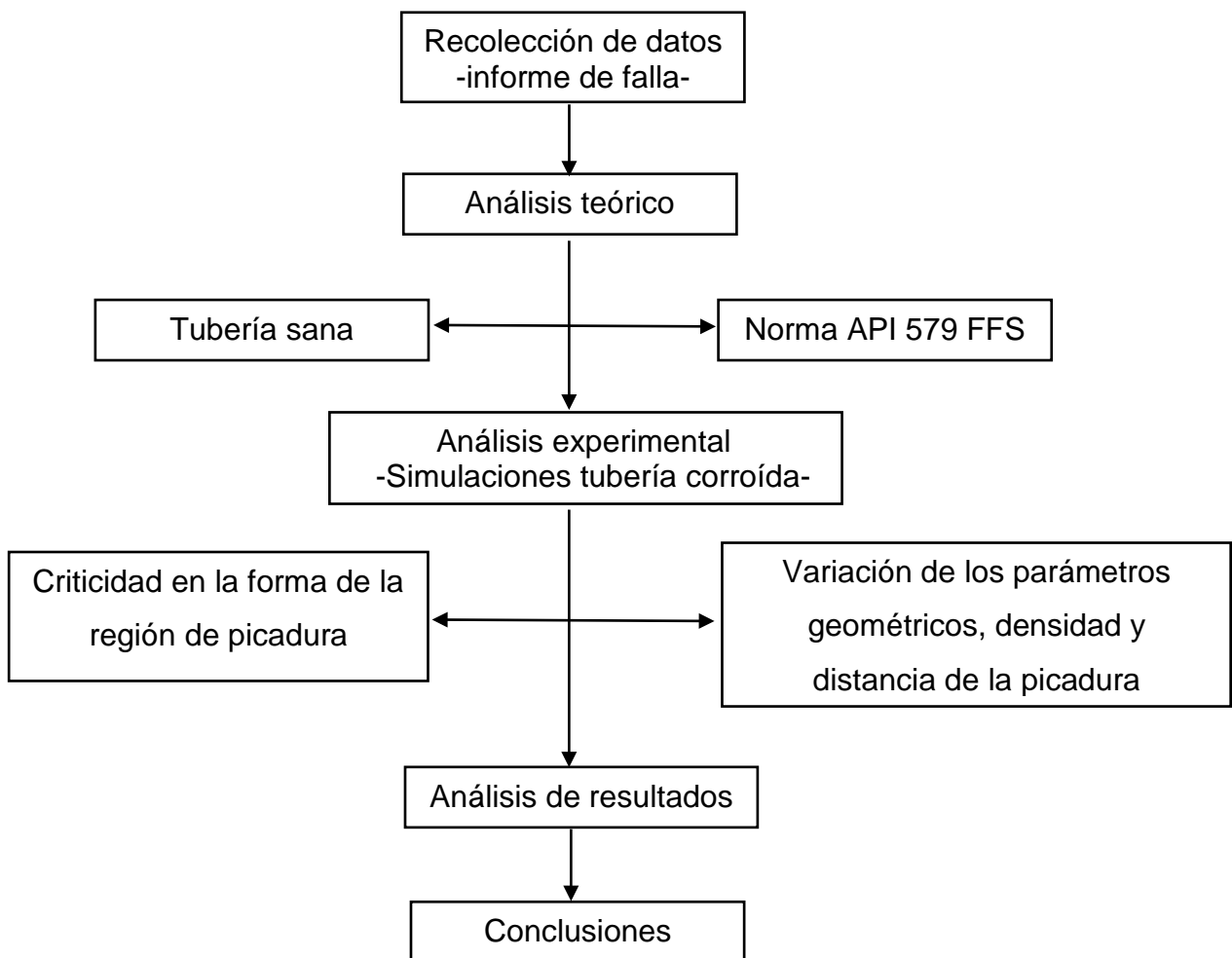
Cuando el punto de interés está dentro de una región particular de elementos e y a es un nodo asociado por fuera de la región de elementos, el resultado de $\tilde{\mathbf{N}}_a$ es cero, obteniendo el sistema de ecuaciones algebraicas necesario donde

$$\mathbf{K}\tilde{\mathbf{u}} + \mathbf{f} = \mathbf{0} \quad (24)$$

7. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

A continuación se especifican las diferentes etapas para el proceso de análisis de la investigación realizada (Figura 1).

Figura 1. Diagrama de flujo del análisis experimental



8. BANCO DE INFORMACIÓN

El modelo numérico analizado en el presente trabajo se realizó con base en un informe de falla ocasionado por corrosión tipo picadura en uno de los sistemas de tubería de una empresa petrolera, referente al estudio de dos tramos de tubería denominadas M1 y M2 (Figura 2), cuyo diámetro nominal era de 8 pulgadas y la presión de operación igual a 200 psi (1.38 MPa).

Figura 2. Dos secciones de tubería afectada por corrosión tipo picadura.



Fuente: Informe

En dicho informe hay un análisis por espectrometría de emisión óptica cuyo resultado precisa la composición química de las dos muestras analizadas como acero de bajo carbono tipo 5L. Para la presente investigación se asume que el material es API 5L X56, porque su composición química porcentual está dentro del rango establecido para este tipo de acero. Las propiedades mecánicas correspondientes a este material se muestran en la

Tabla 1. Propiedades mecánicas del acero API 5L X56.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del acero API 5L X56.

Esfuerzo de fluencia MPa	Esfuerzo de rotura MPa	Módulo de Young GPa	Coefficiente de Poisson	Densidad kg/m ³
$\sigma_y = 390$	$\sigma_u = 490$	E = 201	$\nu = 0.3$	$\delta = 7845$

Además proporcionan las especificaciones geométricas de la picadura para los dos tramos de tubería como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones geométricas de la picadura.

	Ancho cm	Largo cm	Profundidad mm
Muestra 1	5,5	35,5	2,7
Muestra 2	5,5	28	13,71

8.1 MODELO ANALÍTICO DE ESFUERZOS EN TUBERÍA SANA

Para validar el modelo numérico de la tubería fue necesario evaluar su comportamiento mecánico en estado sano, de manera analítica y numérica. Los valores obtenidos de los cálculos de tubería sana sirvieron como marco de referencia para la posterior comparación con los resultados de la tubería afectada por picadura y los respectivos cambios mecánicos del elemento.

Las especificaciones geométricas estándar de la tubería son proporcionadas por el manual de flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías de Crane [28], y se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Especificaciones geométricas de la tubería.

Radio exterior	Radio interior	Radio medio	Espesor
$r_e = 109.55 \text{ mm}$	$r_i = 94.45 \text{ mm}$	$r_m = 101.995 \text{ mm}$	$t = 15.09 \text{ mm}$

Las ecuaciones utilizadas para el cálculo de los esfuerzos fueron las de recipientes a presión de paredes gruesas (5)-(8) porque la relación entre el radio medio y el espesor de la tubería resultó menor a diez ($r_m/t = 6,76$). Los valores dados a continuación son los resultados analíticos de esfuerzos, en tubería sana, obtenidos con base en dichas ecuaciones.

$$\sigma_\theta = 9.37 \text{ MPa}$$

$$\sigma_r = -1.38 \text{ MPa}$$

$$\sigma_l = 2.39 \text{ MPa}$$

$$\sigma_e = 9.09 \text{ MPa}$$

8.2 MODELO NUMÉRICO DE ESFUERZOS EN TUBERÍA SANA

La caracterización del modelo, las condiciones del material del material y el tipo de malla se describen en esta sección.

8.2.1 Caracterización del modelo. La caracterización geométrica del modelo y el material de la tubería se basaron en el informe de falla mencionado anteriormente. Los parámetros geométricos de la tubería analizada son mostrados en la

Tabla 4.

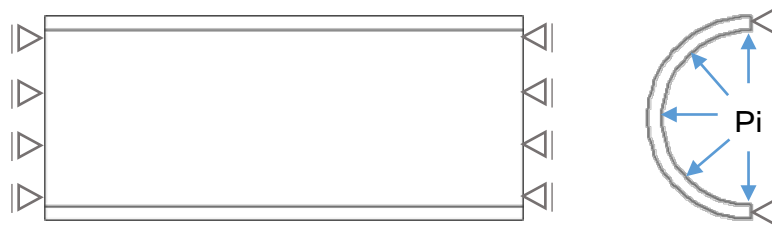
Tabla 4. Parámetros geométricos de la tubería.

Diámetro exterior	Diámetro interior	Espesor	Longitud
$D_e = 219.1 \text{ mm}$	$D_i = 188.9 \text{ mm}$	$t = 15.09 \text{ mm}$	$L = 500 \text{ mm}$

8.2.2 Consideraciones generales del modelo numérico. El material de la tubería se consideró homogéneo e isotrópico y por ende sus esfuerzos y deformaciones proporcionales. No se consideraron los soportes, bridas, juntas soldadas y presión exterior, debido a que solo se analiza un tramo de tubería. Por otra parte, Además se despreció la dilatación térmica porque en el caso de estudio, se tiene una temperatura máxima de $86.1 \text{ }^\circ\text{C}$, y máxima variación de temperatura incrementará la deformación térmica a una razón no mayor de 50 veces el coeficiente de dilatación. Al ser este un valor de potencia negativa de 5, el valor de esfuerzo será despreciable en comparación a los esfuerzos triaxiales generados en recipientes por la presión interna.

8.2.3 Mallado y condiciones de contorno. La tubería es modelada con elementos estructurales hexaédricos. Las condiciones de contorno aplicadas al modelo fueron la presión interna uniforme de 1.38 MPa (200 psi) y restricciones de desplazamiento para representar continuidad en la tubería [22] (Figura 3). Para las condiciones de contorno, se analizaron 3 posibles casos de restricción en la tubería, el primero es la tubería con soporte fijo en sus caras laterales, representando un caso de tubería empotrada en sus extremos, tipo tanque. El segundo caso es un soporte fijo en uno de sus extremos y una cara lateral con desplazamiento libre para el análisis de una tubería con un componente, p.e. una válvula de paso, en uno de sus extremos, y el tercero, seleccionado en la presente investigación, se restringe el desplazamiento en el eje z, como se mencionó anteriormente, este tipo de condición representa la simetría de una sección de tubo y afecta el valor de la tensión longitudinal calculada.

Figura 3. Condiciones de contorno en la tubería

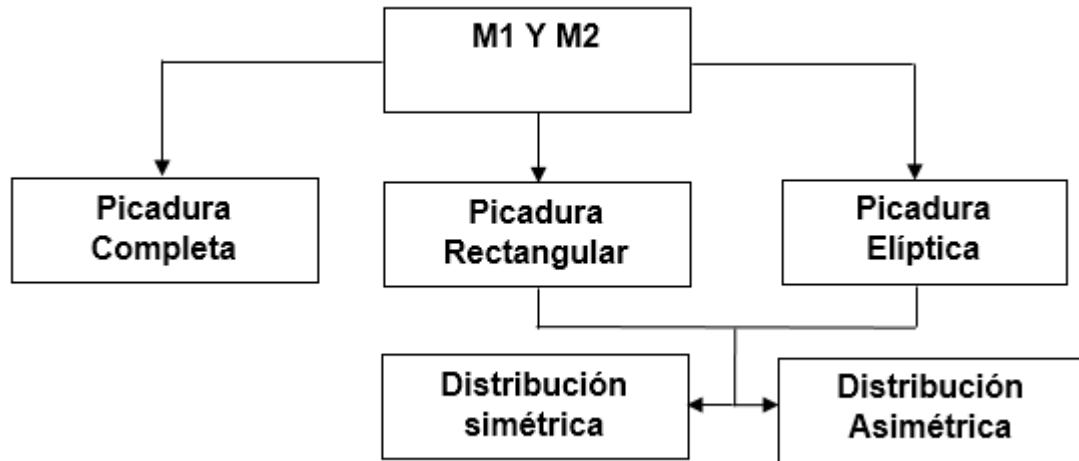


8.3 ANÁLISIS NUMÉRICO DE ESFUERZOS EN TUBERÍA AFECTADA

Basados en las características de las dos muestras en estado de corrosión se procedió a identificar la distribución de picado más crítica. Con el objetivo de entender el comportamiento de esfuerzos en función de la geometría real de la picadura, se realizaron pruebas similares a cada una de ellas, con un total de 6 simulaciones para cada muestra, donde se comparó la posible distribución de la picadura (Figura 4).

Las picaduras se generan de forma aleatoria en los materiales afectados, y su forma está sujeta a múltiples variables, éstas se pueden considerar como círculos irregulares amorfos. Para el caso de estudio, en la búsqueda de la parametrización y caracterización del daño de la picadura, hubo la necesidad de estandarizar una forma geométrica con el objeto de facilitar los cálculos. La figura geométrica a utilizar fue una elipse, la cual es lo más cercano a un círculo irregular amorfo, esta forma evita que haya singularidades en el campo de tensiones causadas por esquinas reentrantes.

Figura 4. Modelo numérico para comprobar la configuración de picado más crítica.

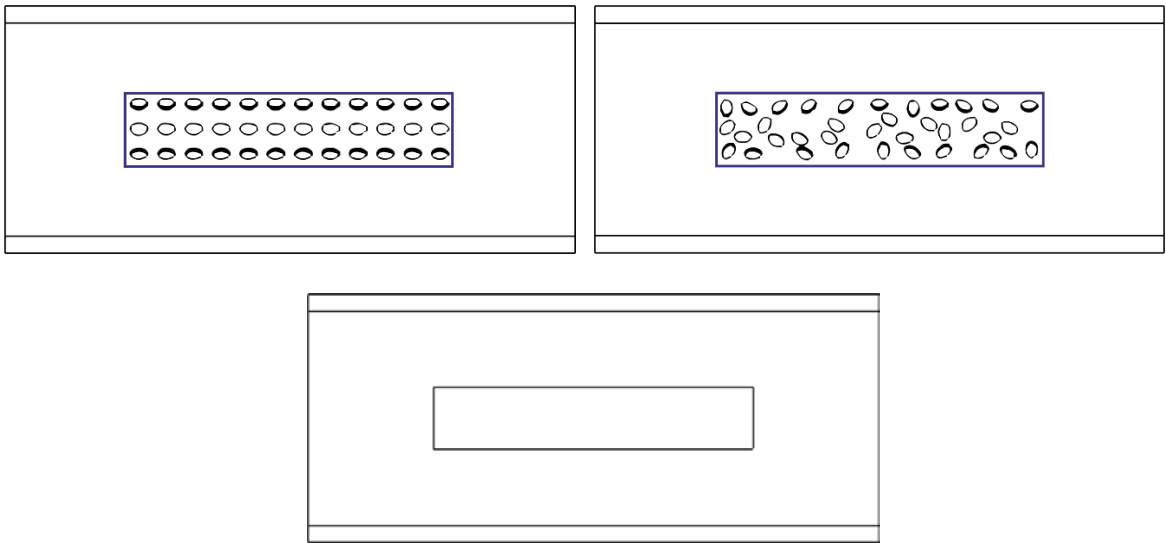


Picadura Rectangular

Para el análisis de la picadura rectangular, en las muestras 1 y 2 se distribuyó dentro del perímetro de la picadura un total de 54 y 36 huecos elípticos respectivamente, con un radio mayor igual a 7.5 mm y un radio menor igual a 5 mm. La profundidad en el primer caso fue de 2,7 mm y en el segundo de 13,71 mm.

Posteriormente, se establecieron tres casos de distribución: el primero, ubicando las picaduras de forma simétrica, como caso ideal, debido a su facilidad de cálculo. En El segundo, con ubicación asimétrica, representación real de la distribución en una picadura, y el tercero una picadura completa del tamaño del área afectada en cada muestra, con su respectiva profundidad. La distribución del experimento de picadura rectangular se refleja en la Figura 5.

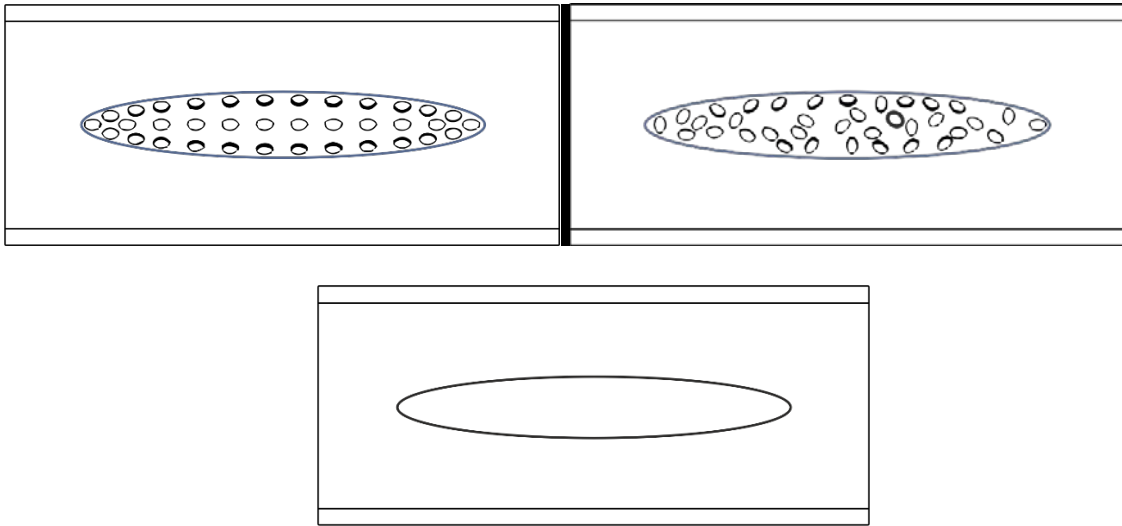
Figura 5. Distribución de la picadura rectangular.



Picadura Elíptica

En el análisis elíptico se manejan las mismas condiciones de la picadura rectangular en los casos seleccionados para el estudio, con la única diferencia del cambio geométrico de la región de la picadura. Las áreas entre muestras de la picadura elíptica y rectangular son equivalentes. El modelo de distribución se muestra en la Figura 6.

Figura 6. Distribución de la picadura elíptica.



8.3.1 Condiciones de contorno. Se aplicó una presión de operación de 1,38 MPa (200 psi) en dirección normal sobre la superficie interna de la tubería y los huecos de la picadura. Este procedimiento se repitió para cada una de las simulaciones de cada muestra.

Además, se realizaron dos restricciones de desplazamiento, la primera en el eje z al igual que en el modelo numérico de la tubería sana, y la otra en el eje x debido a que solo se analizó la mitad del tramo de tubería.

8.3.2 Tamaño de malla . En la presente investigación se utilizaron elementos tetraédricos debido a que son fáciles de crear automáticamente, mientras que la generación de elementos hexaédricos de alta calidad es muy difícil para formas complejas [29] como las tuberías afectadas por picadura. Además la diferencia en los resultados numéricos es aceptable, tal como lo enuncia Ramos y Simões [30], quienes estudiaron la diferencia entre el uso de elementos hexaédricos y tetraédricos de primer y segundo orden en el modelado numérico del fémur

proximal y encontraron que los resultados obtenidos con elementos tetraédricos dependen más del grado de refinamiento de la malla, además, en su investigación los elementos lineales tetraédricos permitieron resultados más próximos a los teóricos, aunque los elementos cuadráticos hexaédricos parecían ser más estables y menos influenciados al grado de refinamiento de la malla. Los resultados obtenidos simulando el fémur proximal realista con elementos tetraédricos y hexaédricos de primer y segundo orden no evidenciaron diferencias significativas.

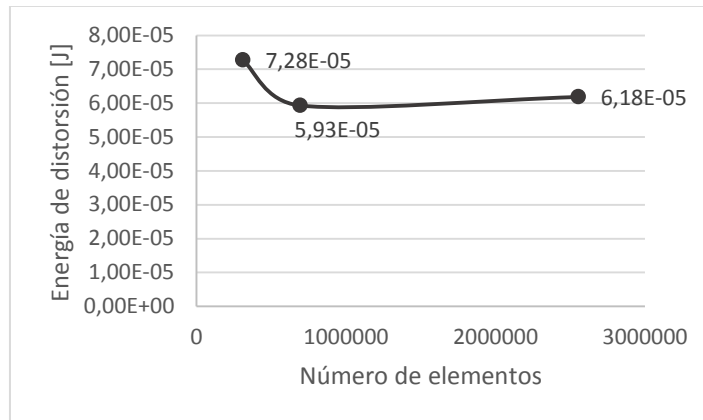
En relación con esto último, se utilizó un tamaño de elemento más pequeño en la zona crítica (picadura) con el fin mejorar la exactitud en los resultados del modelo numérico, en la Tabla 5 se muestra el número elementos promedio así como su tamaño máximo y mínimo en las mallas de los modelos de tubería afectada.

Tabla 5. Parámetros promedio de las mallas en tubería afectada.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Tamaño máximo del elemento	3,061	mm
Tamaño mínimo del elemento	0,16	mm
Número de elementos	4.407.862	-

El número de elementos fue modificado progresivamente en una serie de iteraciones hasta obtener convergencia con un error menor al 5% en la energía de distorsión máxima del modelo (Figura 7). En el Anexo B se encuentran las convergencias para todos los modelos numéricos de tubería afectada realizados en el presente trabajo.

Figura 7. Gráfica de convergencia para la región elíptica simétrica M1.



8.4 VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LA PICADURA

Los resultados tomados del análisis de las muestras M1 y M2 sirvieron como base para estudiar el daño ocasionado por la picadura a una tubería. En el experimento de distribución de picadura rectangular y elíptica dado en la sección anterior solamente se determinó de forma general los esfuerzos máximos en función de su geometría. Para un análisis detallado fue necesario un mayor número de simulaciones multivariantes. El diámetro mayor, el diámetro menor, la densidad y la distancia, fueron las utilizadas para determinar la caracterización del daño ocasionado por la picadura interna. En la Tabla 6. Variación de los parámetros geométricos de la picadura., se especifica el diseño de experimentos.

Las filas sombreadas de cada color representan un tipo de variación en el experimento. En los primeros tres modelos numéricos, se estableció una zona de picadura constante con varias picaduras internas a las cuales se les varió el diámetro mayor con el fin de comprobar si los esfuerzos se debían al tamaño de la zona picada o al diámetro de las picaduras internas (Figura 8).

Este mismo procedimiento se realizó en los modelos cuatro, cinco y seis con variación del diámetro menor de las picaduras internas a diferencia del anterior donde se varió el mayor (Figura 9).

En lo referente a la profundidad no hubo necesidad de aislarla porque en la sección 8.4 quedó suficientemente clara su relación con el esfuerzo. Con el fin de ampliar el análisis se incluyeron otras variables: la densidad y la distancia.

En los modelos siete, ocho y nueve se varió la densidad de las picaduras con el objeto de analizar la influencia de los esfuerzos cuando se aumenta el número de picaduras presentes en una tubería (Figura 10).

Finalmente, en los modelos 10, 11 y 12 la distancia se aumentó en cada caso, para ello se mantuvo el mismo número de picaduras individuales en los vértices de un área cuadrada variable, con el fin de parametrizar el daño en función de ésta (Figura 11).

Tabla 6. Variación de los parámetros geométricos de la picadura.

VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LA PICADURA						
MODELO NUMÉRICO	D _{mayor} mm	D _{menor} mm	w mm	Número de picaduras	P mm	Región cm ²
1	15	10	7,545 (50%)	7	-	13,5
2	23	10	7,545 (50%)	5	-	13,5
3	65	10	7,545 (50%)	2	-	13,5
4	15	9,4	7,545 (50%)	6	-	13,5
5	15	5,75	7,545 (50%)	8	-	13,5
6	15	3,6	7,545 (50%)	10	-	13,5
7	15	10	7,545 (50%)	10	-	19,5
8	15	10	7,545 (50%)	20	-	58,5
9	15	10	7,545 (50%)	40	-	136,5
10	15	10	7,545 (50%)	4	20	10,5
11	15	10	7,545 (50%)	4	30	18
12	15	10	7,545 (50%)	4	40	22,5

Figura 8. Representación de la picadura para los modelos 1, 2 y 3

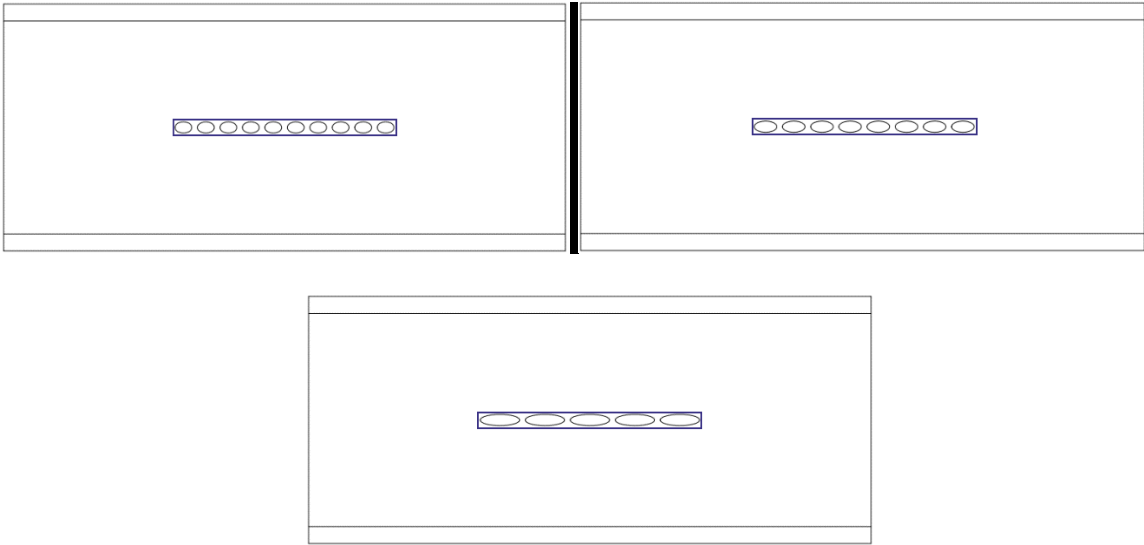


Figura 9. Representación de la picadura para los modelos 4, 5 y 6

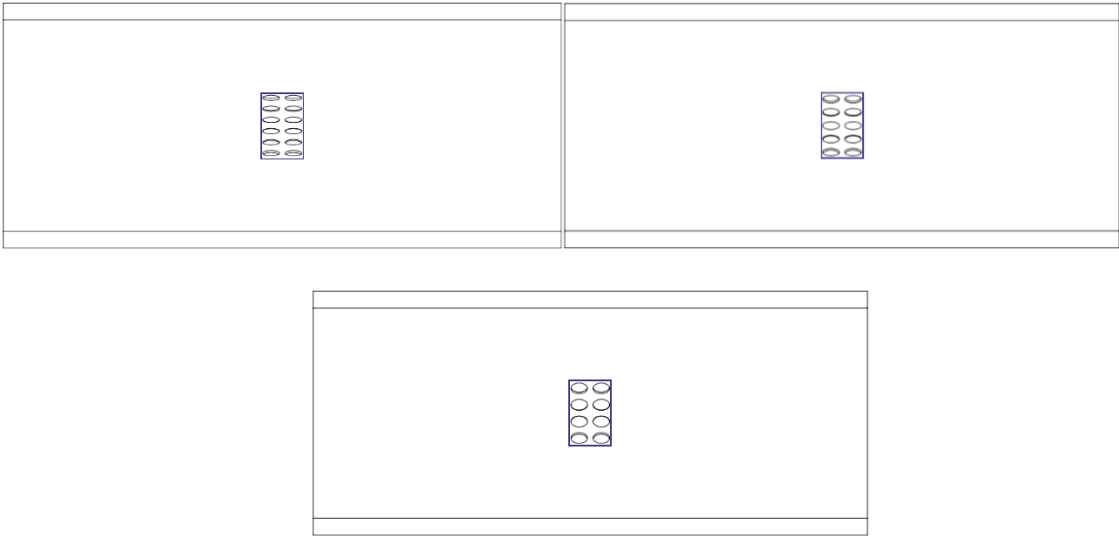


Figura 10. Representación de la picadura para los modelos 7,8 y 9

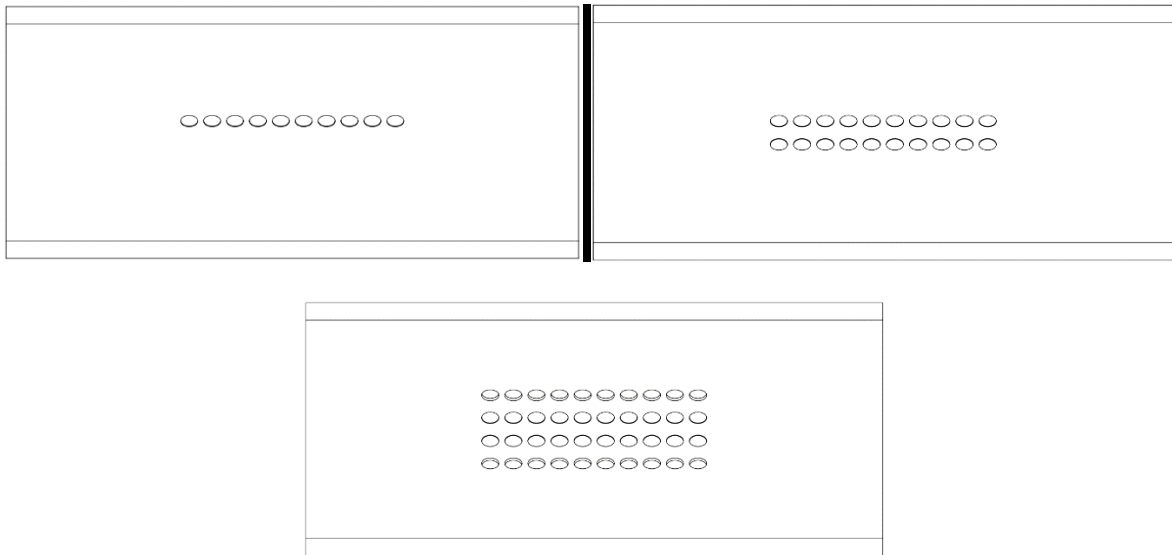
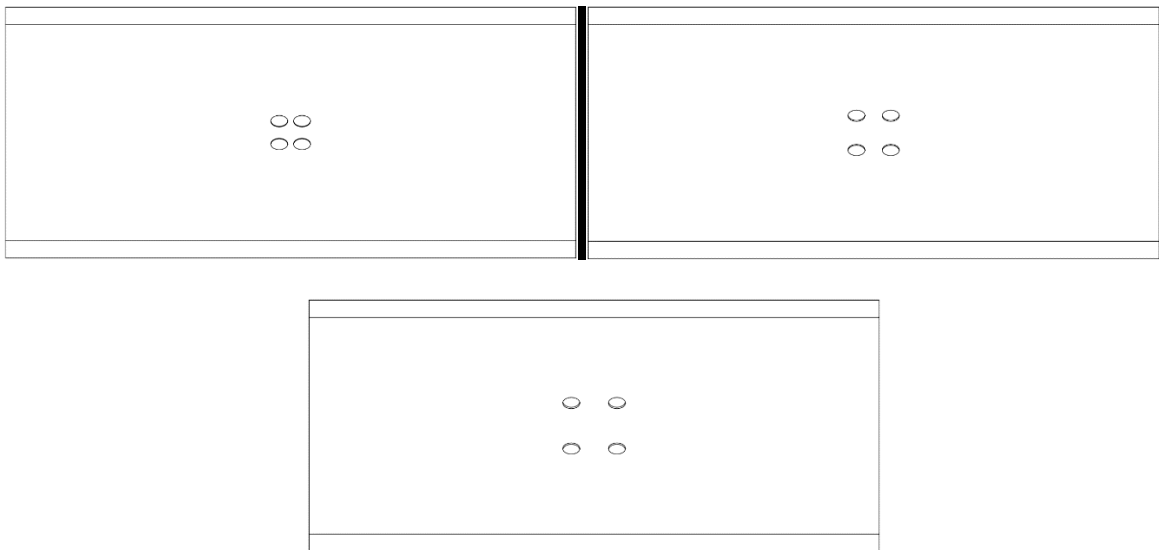


Figura 11. Representación de la picadura para los modelos 10, 11, y 12.



8.5 NORMA API 579 FITNESS FOR SERVICE

La norma API 579 Fitness for Service (FFS), es utilizada para evaluar la integridad estructural de componentes presurizados que poseen algún tipo de falla o daño.

Las pautas proporcionadas en esta norma pueden usarse para tomar decisiones de reemplazo o de reparación en funcionamiento y para ayudar a determinar si el equipo presurizado que contiene fallas que han sido identificadas por inspección, puede continuar operando de manera segura durante algún período de tiempo [4].

En el capítulo 6 de esta norma, se desarrolla la metodología para evaluar componentes a presión afectados por corrosión tipo picadura, mediante 3 niveles. El nivel uno es simple inspección y cálculos sencillos, mientras que en el nivel dos se deben realizar cálculos detallados. Finalmente, si no se satisfacen los criterios de aceptación dados por la norma en los primeros dos niveles, se procede a realizar el nivel tres de evaluación, que es la aplicación de métodos numéricos, con el fin obtener resultados más precisos y menos conservadores.

Para iniciar con el nivel dos de evaluación se requieren ciertos parámetros de la tubería y del defecto. En la Tabla 7, se encuentran los datos de entrada necesarios para calcular los esfuerzos mecánicos de la tubería, según la norma.

Tabla 7. Parámetros requeridos por la norma para iniciar la evaluación.

D	Diámetro interior del cilindro	188.9 mm
d_{avg}	Diámetro promedio de las picaduras	15 mm
D_o	Diámetro exterior del cilindro	219.1 mm
E_c	Eficiencia de la junta soldada	0.7
FCA	Corrosión futura permisible	1.5 mm
LOSS	Perdida de metal en el componente	1.688 mm
P	Presión de operación de la tubería	1.38 MPa
P_k	Distancia entre centros de una pareja de picaduras	20 mm
RSF_a	Factor de resistencia remanente permisible	0.9
S_a	Esfuerzo permisible de la tubería	140 MPa
t_{nom}	Espesor nominal	15.09 mm
t_{rd}	Espesor uniforme	13.4 mm
W_{avg}	Profundidad promedio de las picaduras	2.7 mm

Posteriormente, se desarrollan una serie de ecuaciones para obtener los esfuerzos mecánicos en la tubería: circunferencial, longitudinal y equivalente (Anexo A). Estos esfuerzos fueron comparados con los resultados obtenidos en el modelo numérico de la muestra 1 simétrica en la sección 0.

9. RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el presente trabajo. En la Tabla 9, se realizó la comparación entre los resultados de los cálculos teóricos y los del modelo numérico de tubería sana. Debido a que los porcentajes de error dieron bajos se demostró que el modelo numérico fue bien definido.

Tabla 8. Comparación de los esfuerzos resultantes en la simulación con las ecuaciones analíticas.

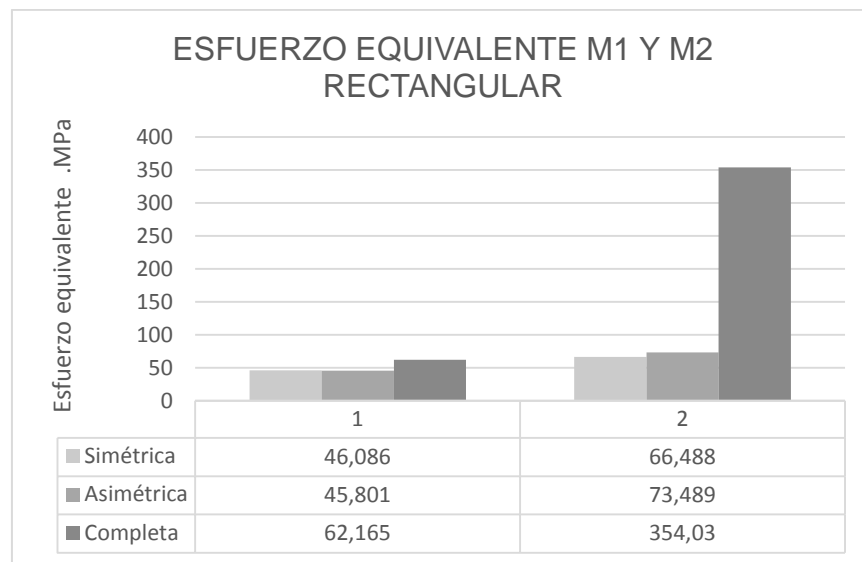
MODELOS Y ERROR (%)	ESFUERZOS			
	σ_{θ} MPa	σ_l MPa	σ_r MPa	σ_e MPa
Modelo analítico	9.37	2.39	-1.38	9.09
Modelo numérico	9.392	2.402	-1.40	9.48
Error %	0.235	0.502	1.44	4.10

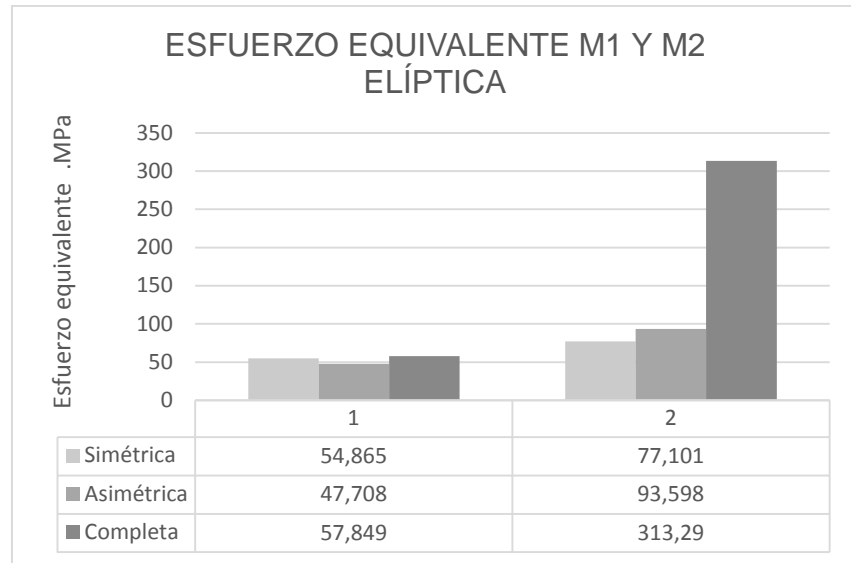
De igual forma, en la Tabla 9, se muestran los esfuerzos máximos y deformación para cada muestra del experimento explicado en la sección 0. Los resultados de la picadura rectangular y elíptica en sus casos simétrico y asimétrico son similares, demostrando así que el incremento en los esfuerzos no se debe a la figura geométrica que el conjunto forma como tal. En este mismo sentido, la profundidad y el área desbastada en la tubería son factores importantes en la generación de esfuerzos, esto se evidencia en la comparación de las muestras 1 y 2 de las picaduras completas, donde existe un aumento significativo de los esfuerzos a pesar de tener áreas iguales, pero distinta profundidad. (Figura 12).

Tabla 9. Resultados de los esfuerzos máximos para las muestras M1 y M2.

PICADURA RECTANGULAR						
	MUESTRA 1			MUESTRA 2		
	<i>Simétrica</i>	<i>Asimétrica</i>	<i>Completa</i>	<i>Simétrica</i>	<i>Asimétrica</i>	<i>Completa</i>
σ_{θ} MPa	65.301	57.765	78.278	77.609	95.103	459.39
σ_1 MPa	23.342	20.923	50.753	34.057	47.072	419.92
σ_r MPa	43.312	41.003	27.233	62.344	56.933	330.29
σ_e MPa	46.086	45.801	62.165	66.488	73.489	354.03
$\varepsilon \times 10^{-4}$ m/m	2.5139	2.7734	3.5004	3.5737	2.7734	20.754
PICADURA ELÍPTICA						
σ_{θ} MPa	73.209	55.125	68.706	87.363	86.577	417.78
σ_1 MPa	26.674	21.234	26.381	36.451	52.427	169.03
σ_r MPa	44.968	39.844	29.232	52.563	66.295	176.85
σ_e MPa	54.865	47.708	57.849	77.101	93.598	313.29
$\varepsilon \times 10^{-4}$ m/m	3.0462	2.6493	3.1098	4.323	4.7699	17.208

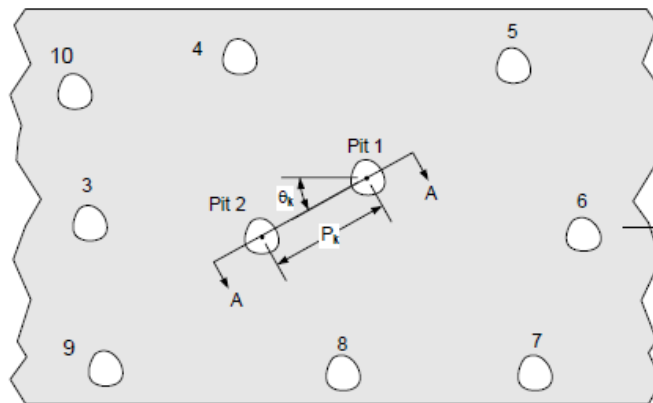
Figura 12. Gráfico de esfuerzo equivalente para las muestras 1 y 2 rectangular y elíptica.





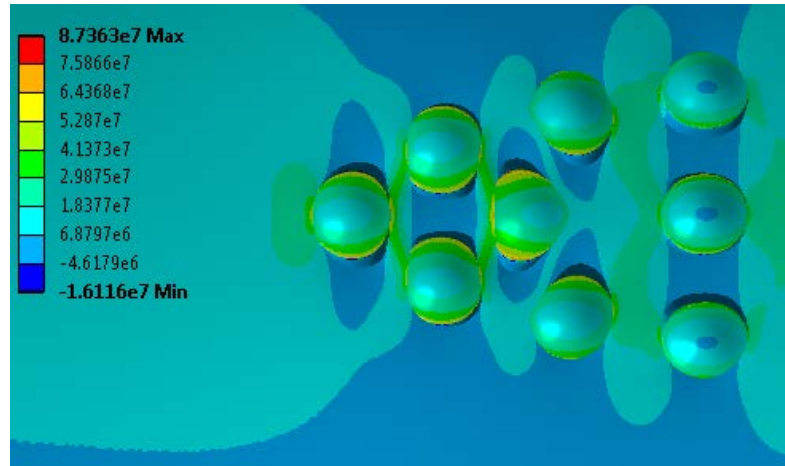
Adicionalmente, los resultados de la muestra 1 simétrica son mayores que los asimétricos, mientras que los esfuerzos de la distribución simétrica de la muestra 2, fueron menores, dichos resultados corroboran lo planteado por la norma respecto al ángulo que se forma entre dos picados y la línea entre sus centros (Figura 13), donde recomienda usar ángulo cero para valores más conservadores, en este sentido el hecho de no tener en cuenta el ángulo en el segundo caso ocasionó la inversión de los resultados.

Figura 13. Ángulo que se forma entre la línea que une los centros de dos picaduras y la horizontal.



Por otra parte, se observó que en todos los modelos numéricos hubo compresión en ciertas zonas de la tubería (Figura 14), generada por la acción de la presión interna en la picadura.

Figura 14. Esfuerzo circunferencial donde se muestra la compresión en la muestra elíptica simétrica 2.



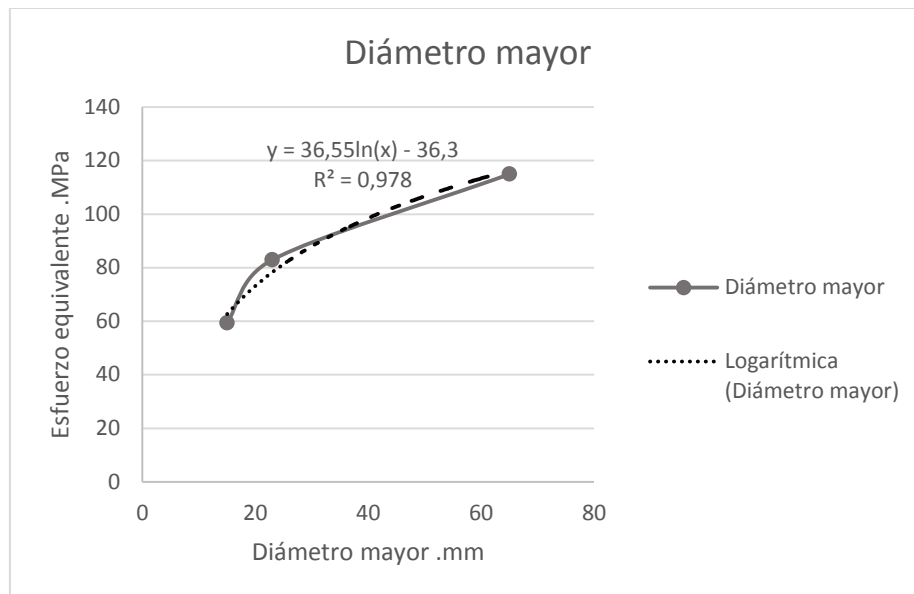
La Tabla 10, refleja los resultados de los esfuerzos de los modelos numéricos presentados en la sección 8.4.

Tabla 10. Esfuerzos máximos de parámetros geométricos variables.

VARIABLE	ESFUERZOS Y DEFORMACIONES				
Diámetro mayor mm	σ_{θ} MPa	σ_l MPa	σ_r MPa	σ_e MPa	$\epsilon \times 10^{-4}$ m/m
15	75.026	32.053	38.537	59.391	3.5181
23	89.357	40.422	55.193	82.941	4.5438
65	120.15	55.032	80.056	114.92	6.476
Diámetro menor mm					
3,6	21.155	8.7489	7.9876	15.422	3.366
5,75	85.353	33.313	47.442	58.639	3.3444
9,4	76.61	28.344	37.589	53.594	0.88107
Número de picaduras					
10	89.904	37.387	60.663	75.467	4.0729
20	74.843	30.269	44.739	58.435	3.1177
40	55.292	21.663	41.239	45.203	2.5178
Distancia mm					
10	79.834	32.121	50.423	61.24	3.5271
20	77.827	30.639	56.887	65.049	3.5964
30	79.436	31.883	60.947	58.706	3.2083

En los modelos numéricos donde se varió el diámetro mayor de la picadura, se pudo apreciar que los esfuerzos dependen del hueco individual y no de la región porque aumentaron proporcionalmente con éste (con una diferencia de casi el 100 % entre el primer y tercer modelo). Dichos resultados son congruentes con los obtenidos en la Tabla 8, donde se concluyó que la forma del área no es el factor clave que determina el aumento de esfuerzos. En la Figura 15 se muestra la variación de éstos esfuerzos y la línea de tendencia que mejor se adapta a los resultados.

Figura 15. Gráfico de tendencia de la variación del diámetro mayor de las picaduras



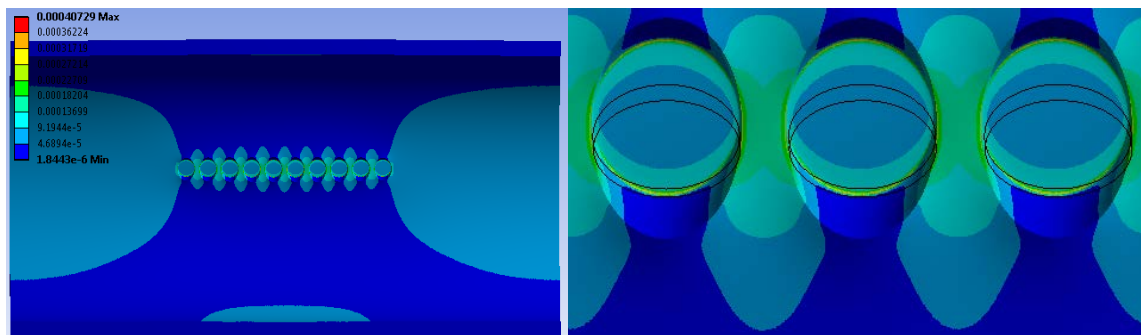
Igualmente, en los modelos cuatro, cinco y seis, los esfuerzos aumentaron con el diámetro, Aunque se observó una gran diferencia en los valores de esfuerzos cuando el diámetro menor del hueco era muy pequeño, nuevamente, la forma y el área desbastada son factores claves en la variación de los esfuerzos.

Ahora bien, en los modelos de variación del número de picaduras se observa que los esfuerzos disminuyeron cuando se aumentó el patrón de picadura de forma lineal. En los modelos siete, ocho y nueve, se evidenció la interacción de cada una

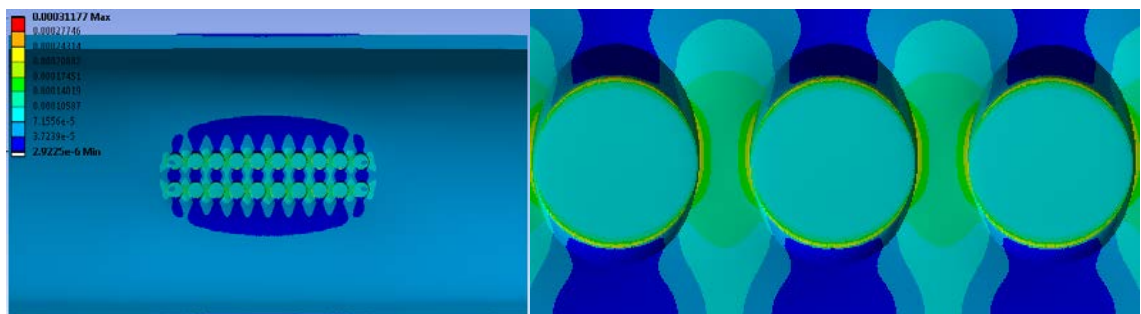
de las filas de picadura con sus pares adyacentes. En la Figura 16 se aprecia como disminuye la deformación a medida que aumenta el número de filas de picaduras, hasta llegar a una forma de picado casi circular en el último modelo, éste comportamiento produce una reducción en el esfuerzo equivalente tal como se aprecia en la Tabla 10. Cabe resaltar que lo anterior no significa que a mayor número de picaduras menores esfuerzos sino que la distribución de picado y el tamaño de los mismos son lo más importante. Si se tuviera el mismo experimento pero con una distribución aleatoria en las picaduras, posiblemente los esfuerzos serían mayores.

Figura 16. Deformación de los modelos numéricos a) 7 y b) 8 y c) 9.

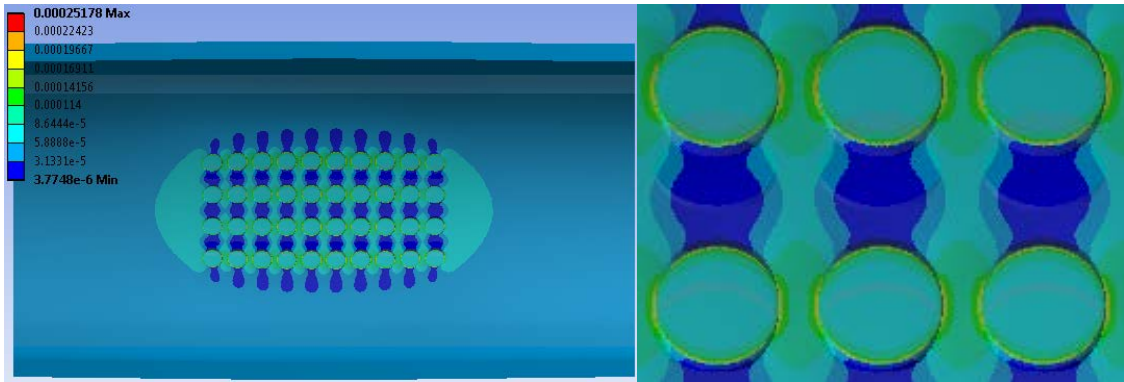
a)



b)

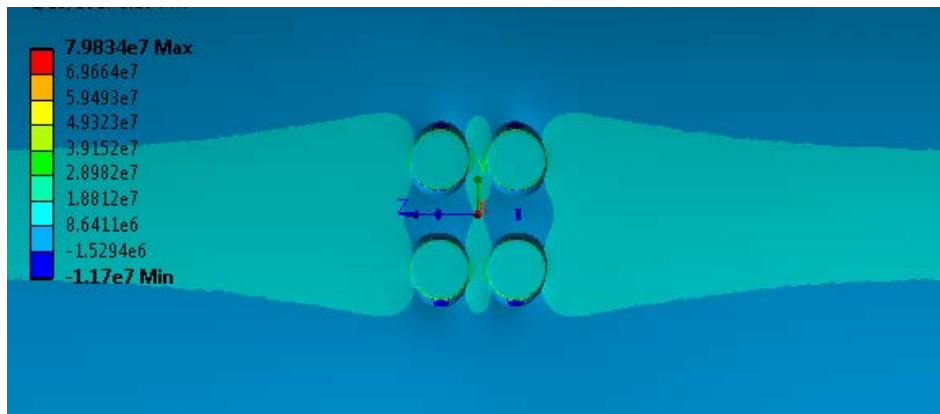


c)



En el análisis de esfuerzos se encontró que la variación de las tensiones mecánicas no fue significativa al variar la distancia entre picaduras, mientras que el esfuerzo circunferencial se mantuvo aproximadamente constante, el esfuerzo radial disminuyó cuando las picaduras eran cercanas (Figura 17 y Figura 18). Se observa en la Figura 18 cómo la tubería se empieza a deformar en compresión a medida que el área entre las picaduras aumenta, esto sugiere que es un juego de suma y resta en el análisis de los esfuerzos equivalentes y se refleja en la donde se aprecia que éstos fueron similares en los 3 experimentos.

Figura 17. Comparación del esfuerzo circunferencial en los modelos 13 y 15 respectivamente



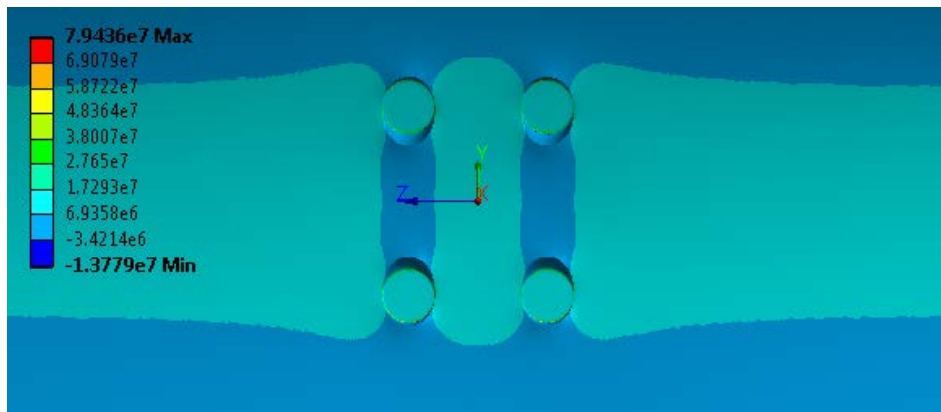
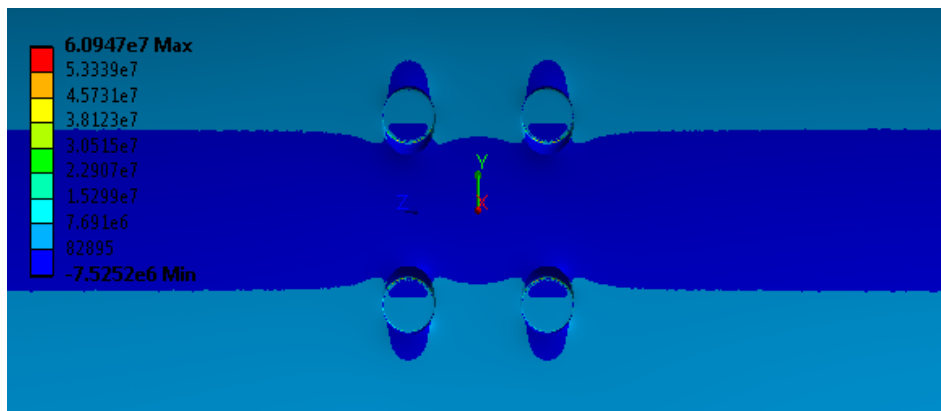
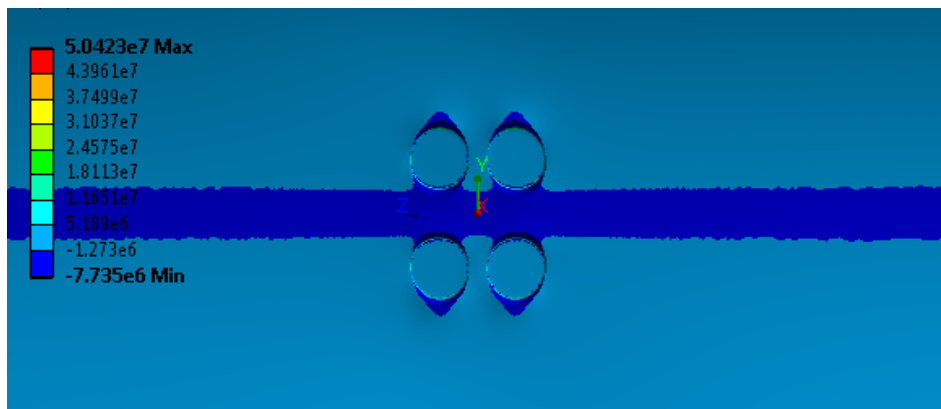


Figura 18. Comparación del esfuerzo radial en los modelos 13 y 15 respectivamente



En la Tabla 11, se pueden apreciar los resultados obtenidos con la norma y con el análisis numérico. A partir estos resultados, se deduce que los valores de esfuerzos proporcionados por la norma son una guía de datos permisibles con los

cuales la tubería corroída puede ser operacional. Estos valores no garantizan un resultado de daño real sino un valor promedio. El segundo nivel, caracteriza el daño según un patrón de geometría de picadura y tubería. El modelo matemático usado por la norma está estrictamente ligado a la geometría de la picadura. Las condiciones externas como el tipo de montaje en la tubería y las cargas suplementarias refinan el resultado de los esfuerzos permisibles, sin embargo, para este caso de estudio son ignoradas debido a que no se analiza un sistema de tubería sino solo una porción de este.

Tabla 11. Comparación entre los resultados obtenidos con la norma y el análisis numérico.

	σ_{θ} , MPa	σ_l , MPa	σ_e , MPa
API 579 FFS	84.84	62.38	76.14
Región rectangular	65.303	23.342	46.085
Región elíptica	73.209	26.674	54.865

El esfuerzo circunferencial de la norma tiene una relación promedio de 1.23 con el modelo numérico de picadura simétrica, mientras que la relación del esfuerzo longitudinal es de 2.5. Esto se debe a que los esfuerzos en la norma están en función de los parámetros geométricos de la tubería y de sus propiedades mecánicas. El resultado que da la norma es un indicativo del esfuerzo permisible, el cual no se debe superar. Cualquier valor de esfuerzo obtenido que esté por debajo del esfuerzo dado por la norma garantiza las condiciones de operación de la tubería.

Teóricamente, el esfuerzo longitudinal se puede escribir de la forma $K\sigma_{\theta}$, donde K toma valores en el rango de 0.3 a 0.5 (caso más crítico, recipiente cerrado). La relación entre el esfuerzo longitudinal y circunferencial en la norma y los modelos es de 0.735 y 0.36 respectivamente, significa entonces que la norma usa el valor más crítico de K para el cálculo del esfuerzo longitudinal, y lo ajusta para ser aún más conservadora.

Adicionalmente, la norma permite calcular la máxima presión de operación reducida ($MAWP_r$) del sistema cuando se encuentra afectado por picadura, todo valor de presión que esté por debajo de éste es aceptable para operación, en el caso de estudio del presente trabajo, la $MAWP_r$ es de 10.26 MPa y la tubería opera a 1.38 MPa, esto significa que la norma posee un factor de seguridad elevado (7.4), y que la tubería puede seguir en funcionamiento.

10. CONCLUSIONES

La norma API 579 FFS garantiza los valores máximos permisibles de operación para los sistemas de tuberías, analizando el daño en las condiciones límites del material. Los altos costos de mantenimiento en los sistemas de transporte de hidrocarburos demandan un análisis detallado de cada uno de los niveles de la norma, con el objetivo de estimar de manera fiable la condición mecánica de un sistema de tubería y planear oportunamente las acciones preventivas de mantenimiento.

En el presente trabajo se realizó el nivel 2 de la norma API 579 FFS y posteriormente el nivel 3 donde se aplicaron los elementos finitos. En la industria se realizan estos dos niveles solo cuando el nivel 1 de evaluación no cumple los requerimientos establecidos por la norma. En éste nivel se efectúa una inspección superficial de la tubería y cálculos sencillos, posteriormente se busca una solución práctica si es posible.

En sistemas de tuberías la picadura debe ser mitigada, en lo posible, desde su diseño por ejemplo con el uso de recubrimientos o materiales compuestos. A su vez, es oportuno definir acciones correctivas cuando ya existe el fenómeno corrosivo para evitar que se torne cada vez más crítico.

Es posible estimar de manera fiable la condición mecánica de una tubería mediante cálculos normativos de nivel 2, esta herramienta es clave para anticiparse a fallas inesperadas que representen pérdidas económicas, deterioro

de la imagen empresarial, incumplimiento a clientes y lucro cesante por falta de un sistema de tuberías que falló y que debe desmontarse para ser reparado.

El esfuerzo radial es significativo en los análisis realizados, mostrando valores más altos que el esfuerzo longitudinal, esto se debe a que la tubería es de pared gruesa, además el esfuerzo circunferencial fue mayor en todos los modelos, siendo congruente con la norma.

Según los experimentos realizados en la presente investigación, los factores que aumentan de esfuerzo por corrosión tipo picadura son: el material perdido, el tamaño del hueco, la forma del hueco, la distribución de las picaduras, distancia y región de la picadura, siendo el primero el más crítico y el último el menos crítico.

Los valores de esfuerzos proporcionados por la norma fueron un poco más elevados que los esfuerzos del modelo numérico, demostrando su carácter conservador. Los valores de esfuerzos de la norma, son valores permisibles, y permiten saber el rango máximo al que podría llegar el esfuerzo en el modelo numérico después de realizado el Fitness for Service.

En la muestra 2 los esfuerzos de la picadura asimétrica fueron mayores que la simétrica, esto se debe a que solo se tuvo en cuenta la distancia entre picados mas no su ángulo, por lo tanto el ángulo entre pares de picados es vital en el cálculo de esfuerzos. Sin embargo es preferible que este valor sea tomado como cero, tal como lo enuncia la norma, para obtener resultados conservadores, factor clave a la hora de analizar tuberías para transporte de hidrocarburos.

La forma de la región picada no tiene un efecto significativo en las tensiones mecánicas de la tubería. Los resultados de la picadura rectangular y elíptica en sus casos simétrico y asimétrico son similares, demostrando así que el incremento en los esfuerzos se debe a factores como distancia, profundidad, área desbastada, forma de los huecos individuales y no de la figura geométrica que el conjunto forma como tal. Además, la picadura rectangular completa en las dos muestras es más crítica debido a sus esquinas reentrantes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Nuhi, T. Abu Seer, A. M. Al Tamimi, M. Modarres, y A. Seibi, "Reliability analysis for degradation effects of pitting corrosion in carbon steel pipes," *Procedia Eng.*, vol. 10, pp. 1930–1935, 2011.
- [2] W. Smith, *Fundamentos De La Ciencia E Ingeniería De Materiales*, Quinta ed. McGraw-Hill, 2014.
- [3] "Más de 26 mil millones de pesos pierde la industria colombiana debido a la corrosión de materiales," 2013. [Online]. Available: <http://noticias.universia.net.co/actualidad/noticia/2013/08/29/1045848/mas-26-mil-millones-pesos-pierde-industria-colombiana-debido-corrosion-materiales.html>.
- [4] Instituto Americano del Petróleo, *API 579 Fitness-For-Service*, Segunda ed. 2007.
- [5] E. Shekari, F. Khan, y S. Ahmed, "A predictive approach to fitness-for-service assessment of pitting corrosion," *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 137, pp. 13–21, 2015.
- [6] J. Sheng y J. Xia, "Effect of simulated pitting corrosion on the tensile properties of steel," *Constr. Build. Mater.*, vol. 131, pp. 90–100, 2017.
- [7] J. W. Calderón-Hernández, I. B. Braga Luz, D. Hincapie-Ladino, y N. Alonso-Falleiros, "Estudio de la resistencia a la corrosión por picadura de aceros inoxidables austeníticos: influencia de la adición de manganeso en solución sólida," *Rev. ION*, vol. 28, no. 1, pp. 63–72, 2015.
- [8] D. Peña, S. Díaz, y P. Reyes, "Determinación de la corrosión en un sistema CO₂ H₂S salmuera acero API 5L X56, utilizando un electrodo de cilindro

- rotatorio,” *UIS Ing.*, vol. 9 No. 2, no. 2, pp. 219–225, 2010.
- [9] B. D. Craig, “Material failure modes, part III: A brief tutorial on corrosion-related material failure modes,” *J. Fail. Anal. Prev.*, vol. 6, no. 2, pp. 12–19, 2006.
- [10] J. B. Choi, B. K. Goo, J. C. Kim, Y. J. Kim, y W. S. Kim, “Development of limit load solutions for corroded gas pipelines,” *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 80, no. 2, pp. 121–128, 2003.
- [11] D. Peña, H. Estupiñán, y W. Vesga, “Evaluación de la corrosión por picado de un acero inoxidable AISI-SAE 630 endurecido por precipitación en agua de mar sintética mediante técnicas electroquímicas,” *UIS Ing.*, vol. 7 No. 1, no. 1, pp. 53–65, 2008.
- [12] C. Rodríguez y M. V. Biezma, “Detección de la corrosión por picadura en aceros inoxidables empleando ultrasonidos,” *Rev. Metal.*, vol. 50, no. 1, p. e005, 2014.
- [13] Y. Chen, H. Zhang, J. Zhang, X. Liu, X. Li, y J. Zhou, “Failure assessment of X80 pipeline with interacting corrosion defects,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 47, no. PA, pp. 67–76, 2015.
- [14] N. Mejía, D. Peña, y M. Barragán, “Evaluación de la corrosión por picado de un acero AISI SAE 1020 en un fluido de pozo sintético mediante ruido electroquímico,” *Fuentes, el reventón energético*, vol. 5 No. 2, pp. 27–31, 2007.
- [15] O. A. G. Estrada, J. L. Enciso, y J. D. R. Herrera, “Análisis de integridad estructural de tuberías de material compuesto para el transporte de hidrocarburos por elementos finitos.,” *UIS Ing.*, vol. 15, no. 2, pp. 105–116, 2016.
- [16] G. Antaki, *Piping and Pipeline Engineering: Design, Construction, Maintenance, Integrity, and Repair*, Primera ed. 2003.

- [17] P. O. H. María Teresa Cortés M, “Corrosión,” *Rev. Hipótesis- Univ los Andes*, no. 4, pp. 12–18, 2004.
- [18] G. Fernández, J. I. Verdeja, y J. a Perosanz, “Conosión por picaduras de una tubería de acero al carbono,” *Rev. Minas -RDM*, vol. 201, pp. 43–48, 2011.
- [19] H. Estupiñán, D. Peña, y V. Macías, “Evaluación del daño por corrosión del acero AISI SAE 4330 en contacto con un lodo de Perforación,” *Fuentes, el reventón energético*, vol. 13, pp. 15–21, 2015.
- [20] API, “Damage Mechanisms Affecting fixed Equipment in the Refining Industry RP 571,” *Am. Pet. Inst.*, no. April 2011, p. 372, 2011.
- [21] M. Cerit, “Numerical investigation on torsional stress concentration factor at the semi elliptical corrosion pit,” *Corros. Sci.*, vol. 67, pp. 225–232, 2013.
- [22] J. E. Abdalla Filho, R. D. Machado, R. J. Bertin, y M. D. Valentini, “On the failure pressure of pipelines containing wall reduction and isolated pit corrosion defects,” *Comput. Struct.*, vol. 132, pp. 22–33, 2014.
- [23] R. M. Pidaparti and R. R. Patel, “Correlation between corrosion pits and stresses in Al alloys,” *Mater. Lett.*, vol. 62, no. 30, pp. 4497–4499, 2008.
- [24] A. Catinaccio, “Pipes under internal pressure and bending,” *CERN*, p. 8, 2010.
- [25] M. Kashani y R. Young, “Hoop stress approximation in offshore design codes,” *Mar. Struct.*, vol. 21, no. 2–3, pp. 224–239, 2008.
- [26] X.-L. Gao, “Elasto-plastic analysis of an internally pressurized thick-walled cylinder using a strain gradient plasticity theory,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 40, no. 23, pp. 6445–6455, 2003.
- [27] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, y J. Z. Zhu, *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, Sixth edition. 2005.

- [28] Crane, "Flujo de fluidos en válvulas accesorios y tuberías." McGraw-Hill Interamericana, p. Apendice B, Tabla B13a.
- [29] X. Bourdin, X. Trosseille, y P. Beillas, "Comparison of tetrahedral and hexahedral meshes for organ finite element modeling: an application to kidney impact," vol. Paper Numb, pp. 1–10.
- [30] A. Ramos y J. A. Simões, "Tetrahedral versus hexahedral finite elements in numerical modelling of the proximal femur," *Med. Eng. Phys.*, vol. 28, no. 9, pp. 916–924, 2006.

BIBLIOGRAFÍA

ANTAKI, G. Piping and Pipeline Engineering: Design, Construction, Maintenance, Integrity, and Repair, Primera ed. 2003.

CRAIG, B. D. "Material failure modes, part III: A brief tutorial on corrosion-related material failure modes," J. Fail. Anal. Prev., vol. 6, no. 2, pp. 12–19, 2006.

INSTITUTO AMERICANO DEL PETRÓLEO, API 579 Fitness-For-Service, Segunda ed. 2007.

SMITH, W. Fundamentos De La Ciencia E Ingeniería De Materiales, Quinta ed. McGraw-Hill, 2014.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. Y ZHU, J. Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, Sixth edition. 2005.

ANEXOS

Anexo A. Cálculos del nivel 2 de evaluación para tuberías con corrosión tipo picadura según la norma API 579 RP Fitness For Service.

Antes de realizar los cálculos requeridos por la norma, es necesario entender la nomenclatura de las ecuaciones, por lo tanto, en la Tabla 12, se encuentra una lista de las variables a utilizar y su significado.

Tabla 12. Nomenclatura del nivel 2 de evaluación de la norma API 579 FFS.

a	Distancia entre el eje centroidal y esfuerzo de flexión
α	Angulo de vertice del cono
A_a	Área de la sección transversal de abertura del cilindro
A_m	Sección transversal del cilindro
D_f	Diámetro del cilindro modificado
D_o	Diametro exterior del cilindro corregido
E_L	Eficiencia longitudinal de la junta soldada
E_{avgk}	-
E_c	Eficiencia circunferencial de la junta soldada
I_x	Momento de inercia del cilindro
P_k	Distancia entre centros de la pareja de picaduras
R_c	Radio interno corregido
S_a	Esfuerzo permisible
W_{avg}	Profundidad promedio de la pareja de picaduras
d_{avg}	Diámetro promedio de la pareja de picaduras
t_c	Espesor futuro corroído
t_{eq}	Espesor equivalente
t_{nom}	Espesor nominal
t_{rd}	Espesor uniforme lejos de la región picada
t_{sl}	espesor requerido para cargas complementarias
θ_k	Ángulo entre la horizontal y la línea que une dos picaduras
μ_{avg}	-
$\rho_{1,k}$	-
$\rho_{2,k}$	-
σ_1, σ_2	Esfuerzos de membrana
σ_e	Esfuerzo equivalente
σ_L	Esfuerzo Longitudinal
σ_c	Esfuerzo Circunferencial
ψ_k	-
ϕ_k	-
D	Diametro interior del cilindro
F	Fuerza axial debido a peso o cargas térmicas
FCA	Corrosión futura permisible

LOSS	Perdida de metal en el componente
M	Momento de flexión
MAWP _L	Máxima presión de operación longitudinal
MAWP _C	Máxima presión de operación circunferencial
MAWP _r	Máxima presión de operación reducida
P	Presión de operación de la tubería
RSF _a	Factor de fuerza remanente permisible
RSF _k	Factor de fuerza remanente de la picadura
RSF _{pit}	Factor de fuerza remanente de todas las picaduras

La corrosión modelada en este trabajo corresponde a un tipo de picadura generalizada. Los siguientes cálculos son proporcionados por la norma para evaluar este tipo de daño. Como no se consideran cargas adicionales los parámetros espesor para cargas complementarias (t_{sl}), Momento de flexión (M) y fuerza axial (F) son igual a cero.

PASO 1. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS D, FCA, t_{rd} , t_{nom} Y LOSS.

$$D = 188.9 \times 10^{-3} \text{ [m]}$$

$$FCA = 1.5 \times 10^{-3} \text{ [m]}$$

$$t_{nom} = 0.01509 \text{ [m]}$$

$$LOSS = t_{nom} - t_{prom}$$

$$t_{rd} = t_{nom} - LOSS$$

$$LOSS = 0.01509 - 0.0134$$

$$t_{rd} = 0.01509 - 0.001688$$

$$LOSS = 0.001688 \text{ [m]}$$

$$t_{rd} = 0.0134 \text{ [m]}$$

PASO 2. CÁLCULO DEL ESPESOR DE PARED QUE SERÁ USADO EN LA EVALUACIÓN.

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

$$t_c = 0.0134 - 0.0015$$

$$t_c = 0.0119 \text{ [m]}$$

PASO 3. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LAS PICADURAS.

Es importante mencionar que la norma recomienda tomar θ_k igual a cero, para un análisis conservador.

$$d_{avg} = 0.015 \text{ [m]}$$

$$W_{avg} = 0.0027 \text{ [m]}$$

$$P_k = 0.02 \text{ [m]}$$

$$\theta_k = 0^\circ$$

PASO 4. CÁLCULO DE LOS ESFUERZOS DE MEMBRANA Y LA MÁXIMA PRESIÓN DE OPERACIÓN (CIRCUNFERENCIAL Y LONGITUDINAL)

$$R_c = \frac{D}{2} + \text{LOSS} + \text{FCA}$$

$$R_c = \frac{0.1889}{2} + 0.001688 + 0.0015 = 0.09764 \text{ [m]}$$

$$\sigma_2 = \frac{P}{2 * E_L} \left[\frac{R_c}{t_c - t_{sl}} - 0.4 \right]$$

$$\sigma_1 = \frac{P}{E_c} * \left[\frac{R_c}{t_c} + 0.6 \right]$$

$$\sigma_2 = \frac{1.38 \times 10^6}{2 * 0.7} \left[\frac{0.09764}{0.0119} - 0.4 \right]$$

$$\sigma_1 = \frac{1.38 \times 10^6}{0.7} * \left[\frac{0.09764}{0.0119} + 0.6 \right]$$

$$\sigma_2 = 7.692 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_1 = 1.735 \times 10^7 \text{ Pa}$$

$$\text{MAWP}_C = \frac{S_a * E_c * t_c}{R_c + (0.6t_c)}$$

$$\text{MAWP}_L = \frac{2 * S_a * E_L * (t_c - t_{sl})}{R_c - 0.4 * (t_c - t_{sl})}$$

$$\text{MAWP}_C = 11.13 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$\text{MAWP}_L = 2.512 \times 10^7 \text{ Pa}$$

PASO 5. DETERMINACIÓN DE LA MÁXIMA PRESIÓN DE OPERACIÓN PARA LA TUBERÍA.

$$MAWP = \text{mín}[MAWP_C, MAWP_L]$$

$$MAWP = MAWP_C = 11.13 \times 10^6 [\text{Pa}]$$

PASO 6. CÁLCULO DEL FACTOR DE FUERZA REMANENTE.

Se utiliza la formulación para el análisis de una capa, porque la picadura ocurre en un lado de la tubería (parte interna).

$$RSF_k = 1 - \frac{W_{avg}}{t_c} * (1 - E_{avgk})$$

$$E_{avgk} = \text{mín} \left[\frac{\Phi_k}{\sqrt{\Psi_k}}, 1.0 \right]$$

$$\Phi_k = \mu_{avg} * \text{máx}[|\rho_{1,k}|, |\rho_{2,k}|, |\rho_{1,k} - \rho_{2,k}|]$$

$$\mu_{avg} = \frac{P_k - d_{avgk}}{P_k}$$

$$\rho_1 = \frac{\sigma_1}{\mu_{avg}}$$

$$\rho_2 = \frac{\sigma_2}{\mu_{avg}}$$

$$\mu_{avg} = \frac{0.02 - 0.015}{0.02}$$

$$\rho_1 = \frac{1.735 \times 10^7}{0.25}$$

$$\rho_2 = \frac{7.692 \times 10^6}{0.25}$$

$$\mu_{avg} = 0.25$$

$$\rho_1 = 6.942 \times 10^7 [\text{Pa}]$$

$$\rho_2 = 3.077 \times 10^7 [\text{Pa}]$$

$$\rho_1 - \rho_2 = 6.492 \times 10^7 - 3.077 \times 10^7$$

$$\Phi_k = 0.25 * 6.942 \times 10^7$$

$$\rho_1 - \rho_2 = 3.865 \times 10^7 [\text{Pa}]$$

$$\Phi_k = 1.735 \times 10^7 [\text{Pa}]$$

$$\psi_k = \left[(\cos^4 \theta_k + \sin^2 2\theta_k)(\rho_{1,k})^2 - \frac{3(\sin^2 2\theta_k)\rho_{1,k} * \rho_{2,k}}{2} + (\sin^4 \theta_k + \sin^2 2\theta_k)(\rho_{2,k})^2 \right]$$

$$\psi_k = 4.819 \times 10^{15}$$

$$E_{avgk} = \min \left[\frac{\phi_k}{\sqrt{\psi_k}}, 1.0 \right]$$

$$RSF_k = 1 - \frac{0.0027}{0.0119} * (1 - 0.25)$$

$$E_{avgk} = \min \left[\frac{1.735 \times 10^7}{\sqrt{4.819 \times 10^{15}}}, 1.0 \right]$$

$$RSF_k = 0.8299$$

$$E_{avgk} = \min[0.25, 1.0]$$

$$E_{avgk} = 0.25$$

PASO 7. DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE FUERZA REMANENTE PROMEDIO PARA CADA PAREJA DE PICADURAS.

Este valor será RSF_{pit} para la región picada. Como todas las picaduras propuestas en el presente trabajo tienen las mismas dimensiones, entonces $RSF_{pit} = RSF_k$.

$$RSF_{pit} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n RSF_k$$

$$RSF_k = 0.8299 = RSF_{pit}$$

PASO 8. CÁLCULO DE LA MÁXIMA PRESIÓN DE OPERACIÓN REDUCIDA.

$$MAWP_r = 11.13 \times 10^6 * \frac{0.8299}{0.9}$$

$$MAWP_r = 10.26 \times 10^6 \text{ Pa}$$

PASO 9. CÁLCULO DEL ESPESOR EQUIVALENTE

$$t_{eq} = B * t_c$$

$$B = \min \left[\frac{RSF}{RSF_a}, 1.0 \right]$$

$$B = \frac{0.8299}{0.9} = 0.9221$$

$$0.9221 < 1.0$$

$$t_{eq} = 0.9221 * 0.0119 = 0.01098 \text{ [m]}$$

PASO 10. CÁLCULO DEL ESFUERZO CIRCUNFERENCIAL MÁXIMO.

$$\sigma_c = \frac{MAWP_r}{RSF_{pit} * \cos(\alpha)} \left[\frac{D}{D_o - D} + 0.6 \right]$$

$$\sigma_c = \frac{10.26 \times 10^6}{0.8299 * \cos(0)} \left[\frac{0.1889}{0.2191 - 0.1889} + 0.6 \right]$$

$$\sigma_c = 84.84 \times 10^6 \text{ [Pa]}$$

PASO 11. CÁLCULO DE ÁREAS TRANSVERSALES Y MOMENTO DE INERCIA

$$D_f = D_o - 2 * t_{eq}$$

$$A_a = \frac{\pi}{4} * (D_f^2)$$

$$D_f = 0.2191 - 2 * 0.01098$$

$$A_a = \frac{\pi}{4} * (0.1971^2)$$

$$D_f = 0.1971 \text{ [m]}$$

$$A_a = 0.03052 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$A_m = \frac{\pi}{4} * (D_o^2 - D_f^2)$$

$$I_x = \frac{\pi}{64} * (D_o^4 - D_f^4)$$

$$A_m = \frac{\pi}{4} * (0.2191^2 - 0.1971^2)$$

$$A_m = 0.007175 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$I_x = \frac{\pi}{64} * (0.2191^4 - 0.1971^4)$$

$$I_x = 0.00003895 \text{ [m}^4\text{]}$$

$$a = \frac{D_o}{2}$$

$$a = 0.1095 \text{ [m]}$$

PASO 12. CÁLCULO DEL ESFUERZO LONGITUDINAL MÁXIMO

$$\sigma_L = \frac{1}{E_c * \cos(\alpha)} * \left[\frac{A_a}{A_m} * MAWP_r + \frac{F}{A_m} + \frac{M * a}{I_x} \right]$$

$$\sigma_L = \frac{1}{0.7 * \cos(0)} * \left[\frac{0.03052}{0.007175} * 10.26 \times 10^6 + \frac{0}{0.007175} + \frac{0 * 0.1095}{0.00003895} \right]$$

$$\sigma_L = 62.38 \times 10^6 \text{ [Pa]}$$

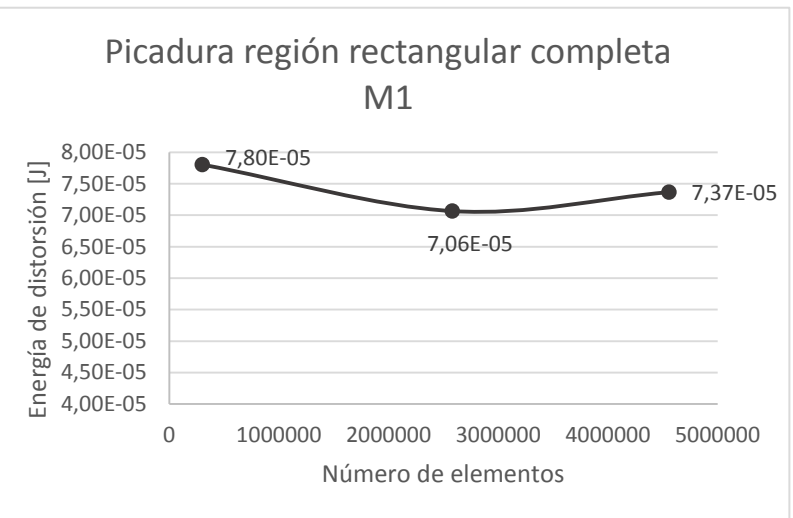
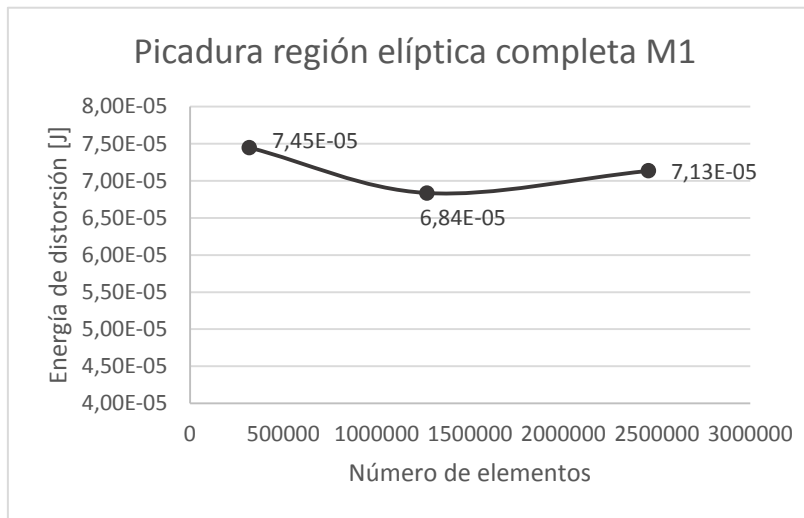
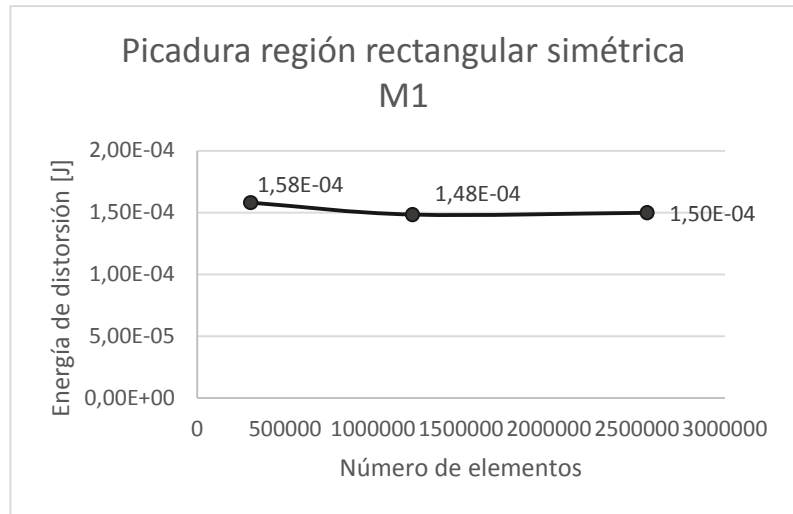
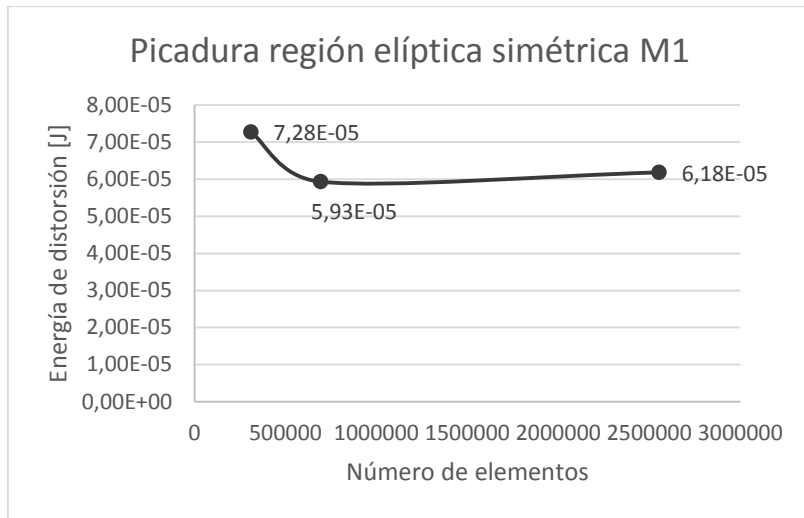
PASO 13. CÁLCULO DEL ESFUERZO EQUIVALENTE.

$$\sigma_{eq} = [\sigma_{cm}^2 - \sigma_{cm} * \sigma_L + \sigma_L^2]^{0.5}$$

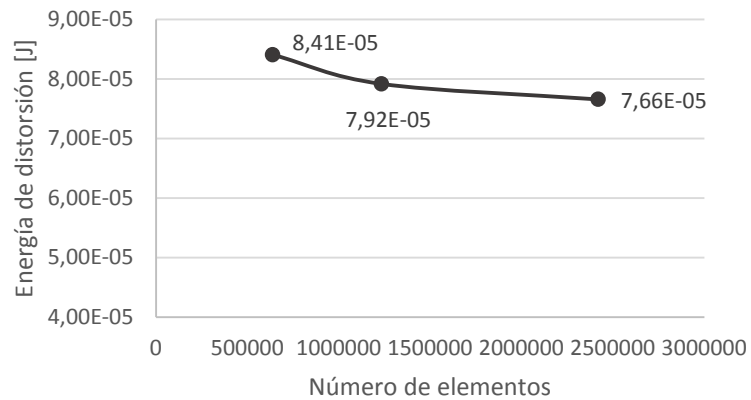
$$\sigma_{eq} = [(84.84 \times 10^6)^2 - 84.84 \times 10^6 * 62.38 \times 10^6 + (62.38 \times 10^6)^2]^{0.5}$$

$$\sigma_{eq} = 76.14 \times 10^6 \text{ [Pa]}$$

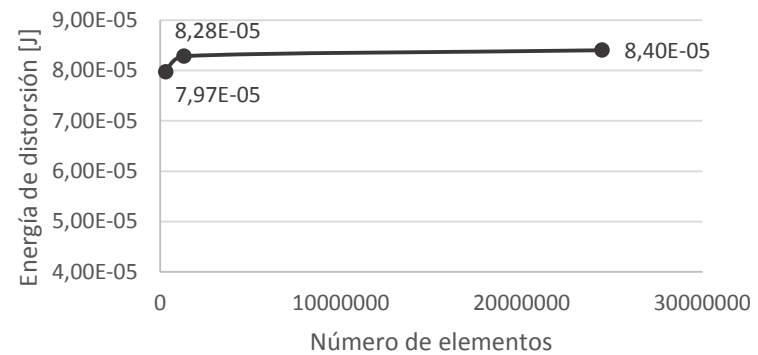
Anexo B. Convergencias. a) Convergencias de las muestras 1 Y 2.



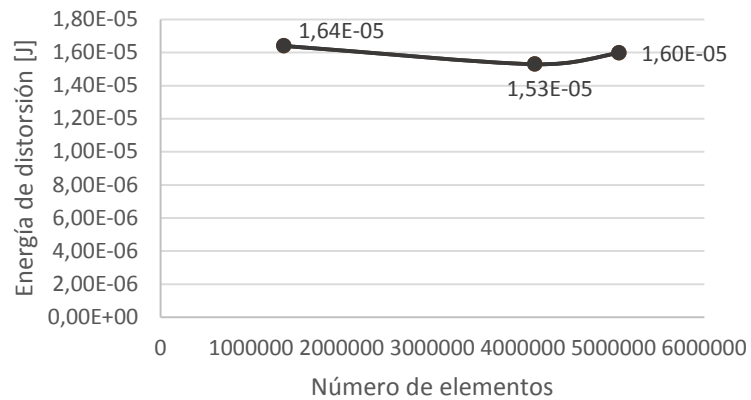
Picadura región elíptica asimétrica M1



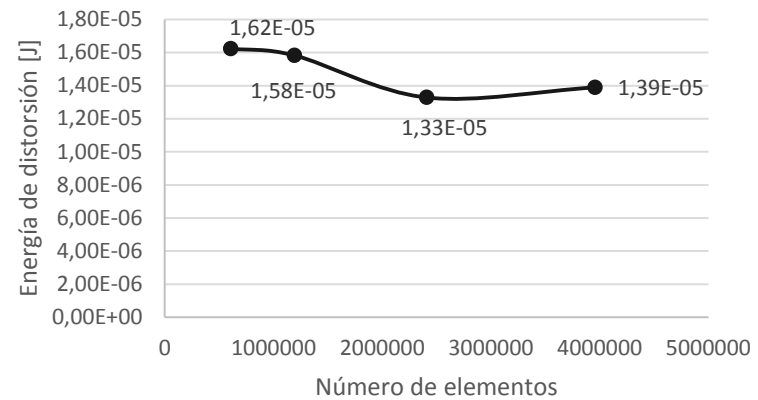
Picadura región rectangular asimétrica M1

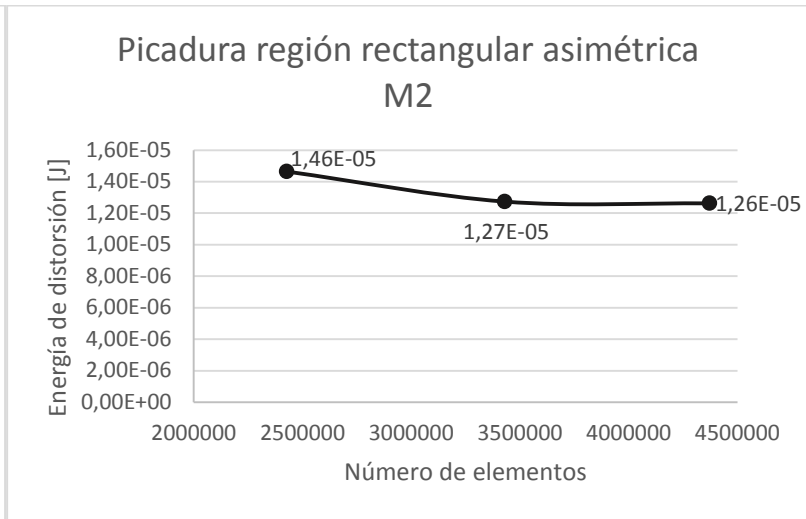
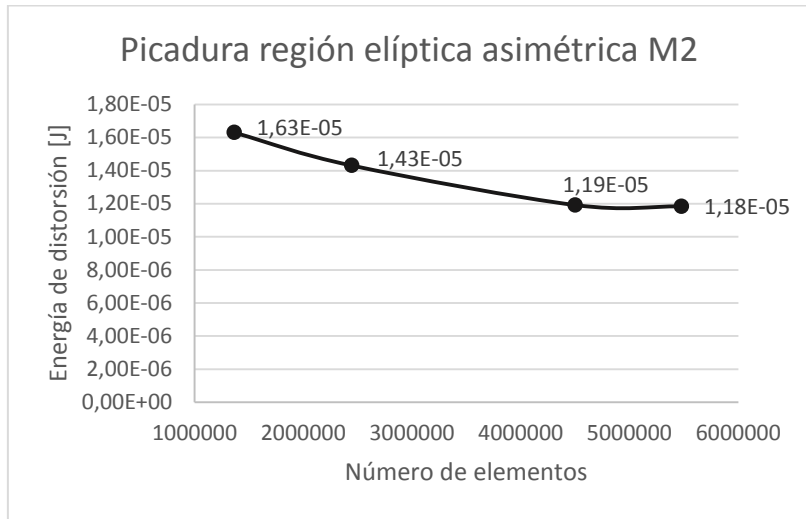
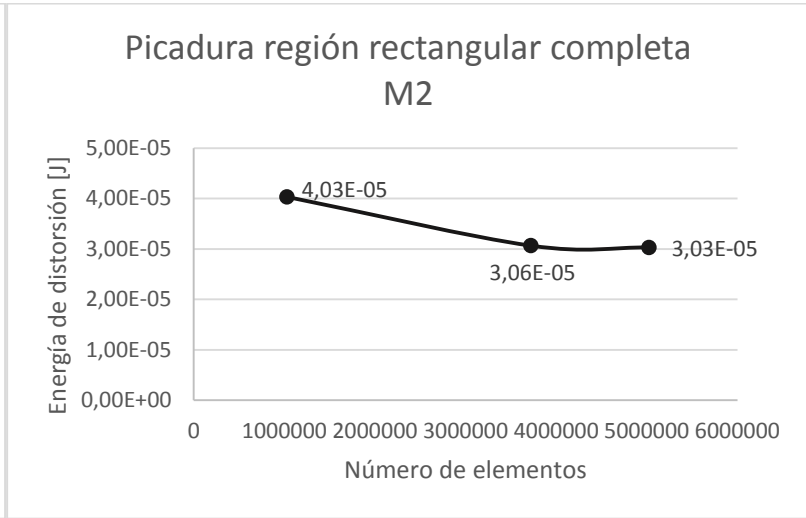
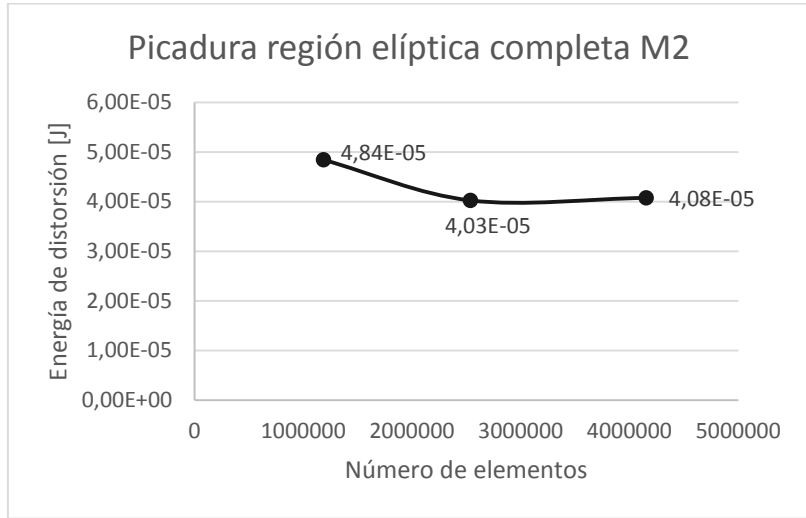


Picadura región elíptica simétrica M2



Picadura región rectangular simétrica M2





b) Convergencias de los modelos numéricos de variación: largo, ancho, densidad y distancia.

