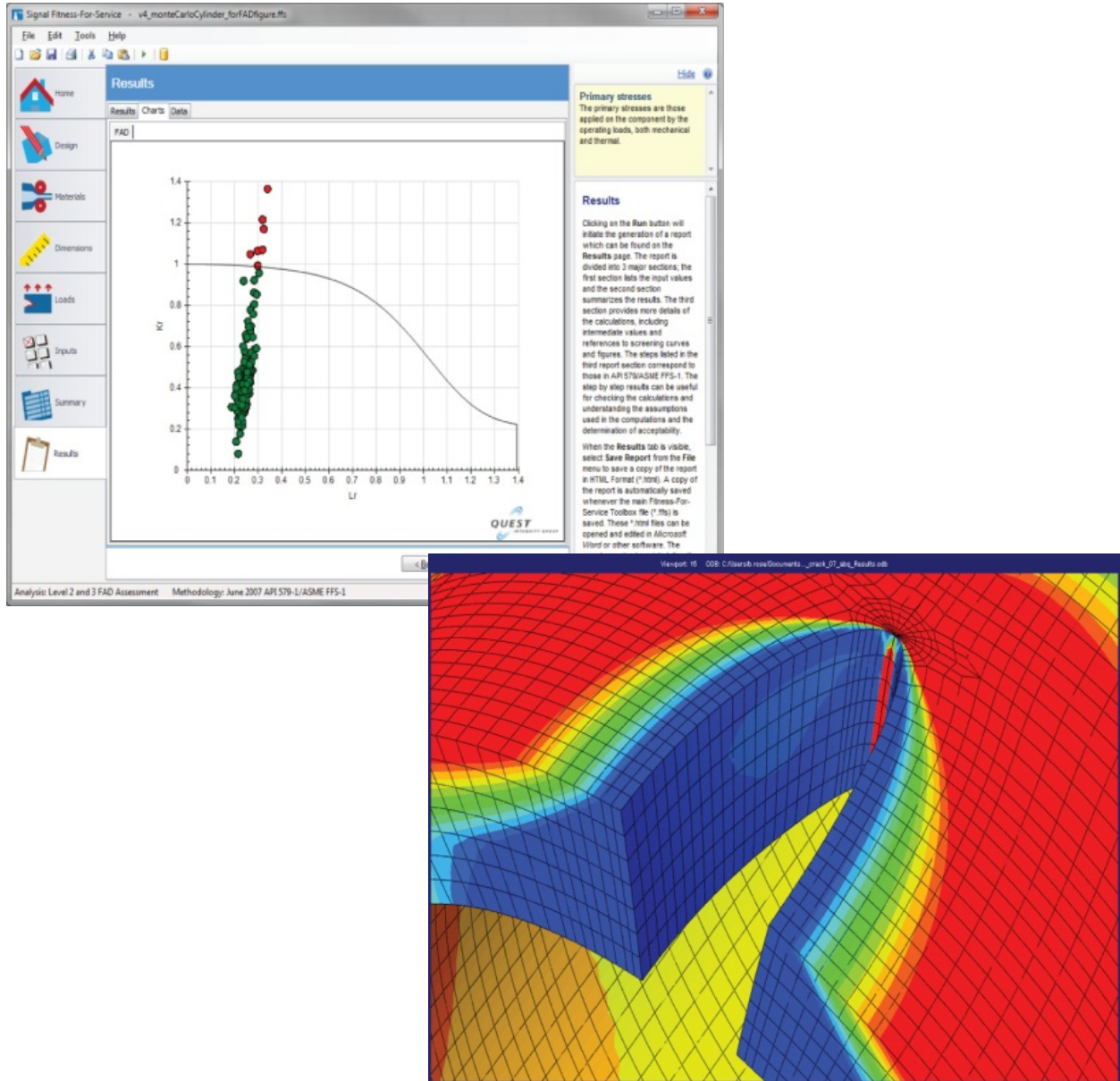


Metodología de evaluación, simulación y proyección del comportamiento de grietas generadas por corrosión bajo esfuerzo, presentes en ductos que transportan hidrocarburos.



Autores:

Luis Fernando Betancourt Sanchez

Petróleos Mexicanos – PEMEX

Subdirección de Desarrollo Sustentable, Salud y Protección Ambiental

Mauricio Salvador Chéquer Trejo

Quest Integrity MEX S.A. de C.V.

Gerente General América Latina

1. Resumen

Dentro de las múltiples amenazas a la integridad de un ducto, en los últimos 20 años la presencia del agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo o stress corrosion cracking (SCC), ha sido una de las más frecuentes y significativas en nuestro país, afectando principalmente a ductos que transportan hidrocarburos líquidos y que son las principales arterias de abastecimiento de crudo para las refinerías que se encuentran en la parte central y norte del país.

Hasta el momento, las principales metodologías de evaluación grietas relacionadas con el stress corrosion cracking, se basan en los datos obtenidos mediante inspecciones inteligentes y su respectiva simulación con valores teóricos o idealizados de: presión, longitud, profundidad, tenacidad etc. Los cuales permiten llegar a un nivel II de evaluación reconocido por el estándar API 579-1/ASME FFS-1. Esta evaluación nivel II incluida en diferentes programas comerciales, permite conocer el estado de aceptabilidad o rechazo de una anomalía tipo grieta al momento de la evaluación sin embargo, no aporta ninguna información respecto al tiempo en que esta anomalía puede volverse inestable o crítica, tampoco nos permite conocer su comportamiento bajo un escenario en el que cambien los parámetros que la afectan como son: la presión, longitud, profundidad, etc.

En base a esto, surge la necesidad de que las metodologías existentes de evaluación evolucionen hacia un nuevo modelo que permita determinar en tiempo “real” la necesidad de reparación, mitigación y comportamiento futuro de este tipo de anomalías, mediante los parámetros adecuados de simulación con un modelo particular y representativo de cada grieta, al proyectar su comportamiento futuro en base a condiciones de operación también reales.

La metodología propuesta en el presente documento, permitirá modelar de manera científica, confiable y repetible el comportamiento de grietas y anomalías similares, posterior a las actividades de inspección en línea o en sitio, bajo condiciones reales de operación. Esto a su vez, se traducirá en la reducción de costos por reparaciones anticipadas, la atención de anomalías que requieran de atención inmediata y la programación efectiva para la atención de aquellas que en base a esta evaluación no sean consideradas como significativas.

Esta metodología comprenderá en general, tres etapas para la identificación, evaluación y proyección del comportamiento de grietas relacionadas con el SCC y anomalías similares:

1. Evaluación en campo con software especializado (de acuerdo a API 579 Nivel II de evaluación)
2. Creación de un modelo específico para cada grieta (para su posterior evaluación de acuerdo a API 579 nivel 3, análisis por elemento finito, AEF)
3. Mediante la alineación de los datos obtenidos por el sistema SCADA respecto al perfil de presiones de operación con el programa PACIFICA® se llevará a cabo el seguimiento continuo de cada anomalía para simular y proyectar el comportamiento de cada grieta en términos de las variaciones de presión a lo largo del ducto y de sus características particulares de longitud, profundidad etc.

2. Introducción

En la evaluación de grietas y defectos similares en la industria del transporte de hidrocarburos, una de las principales interrogantes es la de conocer con exactitud la magnitud de la presión de operación que este tipo de anomalías puede soportar al igual que el tiempo que puede permanecer en servicio. Con frecuencia, no existen respuestas concretas a estas preguntas, por lo que se recurre a valores teóricos o

aproximados para pronosticar la vida útil remanente de ductos que contienen grietas en servicio.

Para minimizar la incertidumbre que genera el hecho de utilizar datos teóricos para pronosticar el tiempo de vida útil de las anomalías clasificadas como grietas, en los últimos años se han desarrollado nuevos modelos y metodologías basados en mecánica de la fractura que permiten “acercarse” más a la realidad operativa de ductos que operan en presencia de grietas o anomalías similares. Una de estas metodologías es la contenida en el estándar API 579-1/ASME FFS-1 2007, Nivel III [1] la cual, está incorporada en los programas propios de Quest Integrity Group. Esta metodología de **“Evaluación dinámica de grietas”**, propone llevar a cabo las siguientes etapas principales:

- Determinación de las medidas reales de las grietas: profundidad y longitud (pueden utilizarse las características determinadas por una herramienta inteligente, sin embargo, la intención de la metodología es la de reducir el conservatismo implícito al usar este tipo de datos).
- 1ª Etapa de Evaluación: Determinación del FAD con las dimensiones reales, utilizando el programa Signal Fitness for Service®[2].
- 2ª Etapa de Evaluación: Creación del modelo de grieta con el programa FeaCrack®[3], conforme a las dimensiones reales medidas en campo y obtención de la distribución de esfuerzos para determinar la presión de falla de la grieta, bajo condiciones reales de operación.
- Llevar a cabo el cálculo de vida útil remanente de una grieta en particular con el programa Pacifica®[4], utilizando los datos cíclicos de presión provenientes del SCADA para determinar el tiempo estimado de falla.

3. Desarrollo

Con el propósito de mejorar la exactitud de los resultados obtenidos mediante la evaluación de grietas generadas por el SCC, Quest Integrity ha desarrollado una metodología que incluye el análisis por elemento finito (APF) conforme a API 579-1/ASME FFS-1 2007 Nivel III, para determinar la severidad de las colonias de SCC, denominada **“Evaluación dinámica de grietas”**.

La metodología de evaluación dinámica de grietas, tiene su fundamento en los modelos de mecánica de la fractura para ductos que operan en presencia de grietas o colonias de grietas generadas por SCC. Los modelos tradicionales de mecánica de la fractura (como los descritos en el API 579/ASME FFS-1), se aplican a una grieta simple, sin embargo, las colonias de SCC con frecuencia están formadas por múltiples grietas incluso con ramificaciones. La combinación de múltiples grietas y su ramificación, reduce la fuerza motriz relacionada a una sola grieta [5], es decir, con frecuencia un campo de SCC resulta ser menos severo y con una presión de ruptura más alta que una grieta simple con la misma profundidad (Ver Figura 1).

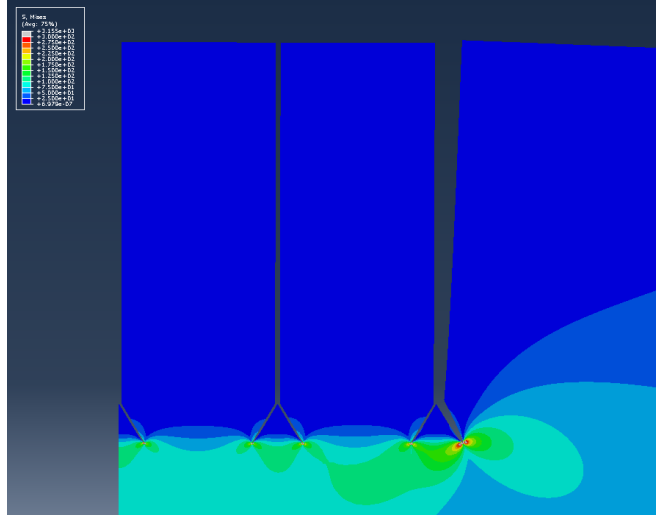


FIGURA 1. Mapa de niveles de esfuerzo (magnificación del desplazamiento), análisis de la mitad simétrica por elemento finito para un arreglo de 5 grietas ramificadas.

4. Metodología de Evaluación

4.1. Creación de un modelo por elemento finito

Para simular una colonia de SCC, se creará un modelo elemento elástico-plástico por elemento finito en tres dimensiones del área dañada, utilizando la longitud y profundidad efectivas de la colonia de SCC (también es posible utilizar los datos provenientes de una inspección en línea). Un ejemplo de un modelo creado por el análisis por elemento finito, se muestra en la Figura 2, el cual es una malla típica utilizada para analizar una grieta presente en un ducto.

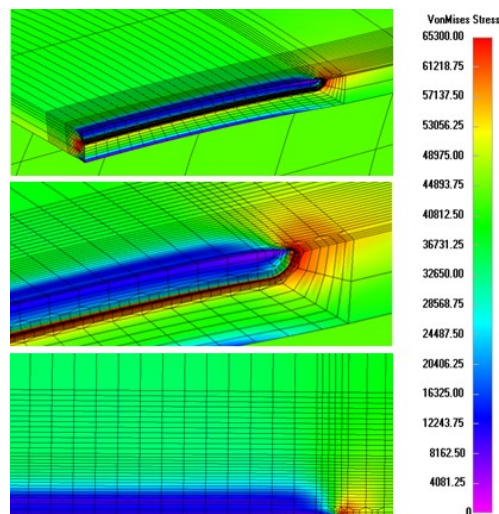


FIGURA 2. Ejemplo de un modelo en 2 y 3D por elemento finito, de una grieta presente en un ducto. El modelo de la zona dañada se utiliza para estimar la integral J, una medida de la fuerza motriz en la grieta, a la presión esperada de falla en la región dañada, los colores a la derecha de esta imagen indican el nivel de esfuerzos en cada punto de la grieta.

Para obtener resultados que sean representativos, es necesario llevar a cabo la determinación de un parámetro conocido como La Integral J[6], este valor a la presión de falla o colapso se convertirá en un factor de intensidad de esfuerzos (K) lo cual a su vez permitirá inferir sobre la tenacidad efectiva del material. Posteriormente, se determinará la presión de ruptura de la colonia SCC en base a la tenacidad efectiva determinada mediante el modelo de Análisis por elemento finito. Este modelo, está formado por una sección del ducto que contiene la grieta orientada longitudinalmente tal como se observa en la Figura 3. Debido a la simetría que guarda este arreglo, únicamente se muestra el mallado de una cuarta parte de la grieta. Para este modelo, se generara una curva esfuerzo-deformación para el material del ducto a ser evaluado.

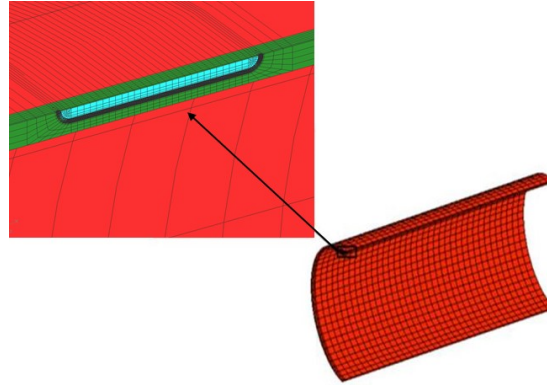


FIGURA 3. Modelo de Elemento Finito para la grieta evaluada, se muestra únicamente una cuarta parte simétrica.

4.2. Calculo de la integral j

El Análisis del modelo creado, se genera a través de múltiples iteraciones para poder graficar la curva del factor de intensidad de esfuerzos K en la punta de la grieta vs. La presión interna. El valor crítico del factor de intensidad de esfuerzos será igual a la tenacidad a la fractura K_c del material, para determinar K_c a partir de la energía de impacto Charpy (CVN) utilizando el 5% del límite inferior de acuerdo a la correlación de Wallin [7]:

$$J_c = 4.482(CVN)^{1.28} \text{ Donde:}$$

$$K_c = \sqrt{\frac{J_c E}{1-\nu^2}}, \text{ E = Módulo de Young, and } \nu = \text{relación de Poisson}$$

Recientes investigaciones de Anderson [8], han demostrado que la fuerza motriz que promueve el agrietamiento en una colonia de SCC (por ejemplo una grieta ramificada), es menor para una grieta simple. Un factor de intensidad de esfuerzos llamado “factor de derribo” Φ , el cual, se define como:

$$\Phi = \frac{K_{SCC}}{K_0}$$

Donde K_{SCC} es el factor de intensidad de esfuerzos para una colonia de grietas de SCC y K_0 es el factor de intensidad de esfuerzos para una grieta lineal simple de la misma profundidad. De los casos analizados, el “factor de derribo” más grande encontrado fue de 0.87, de tal forma que la fuerza motriz para una

colonia de grietas de SCC fue del 87% en comparación con una grieta simple. De forma alternativa, se puede estimar un factor crítico de intensidad de esfuerzos para la colonia de grietas de SCC, K_{c_SCC} como:

$$K_{c_SCC} = \frac{K_c}{0.87}$$

Utilizando los valores de K y P graficados a partir del programa FEACrack®, se puede determinar la presión de falla para un ducto en servicio que contiene este tipo de anomalía, en el intervalo de presiones correspondientes a K_c y K_{SCC} (Ver Figura 4).

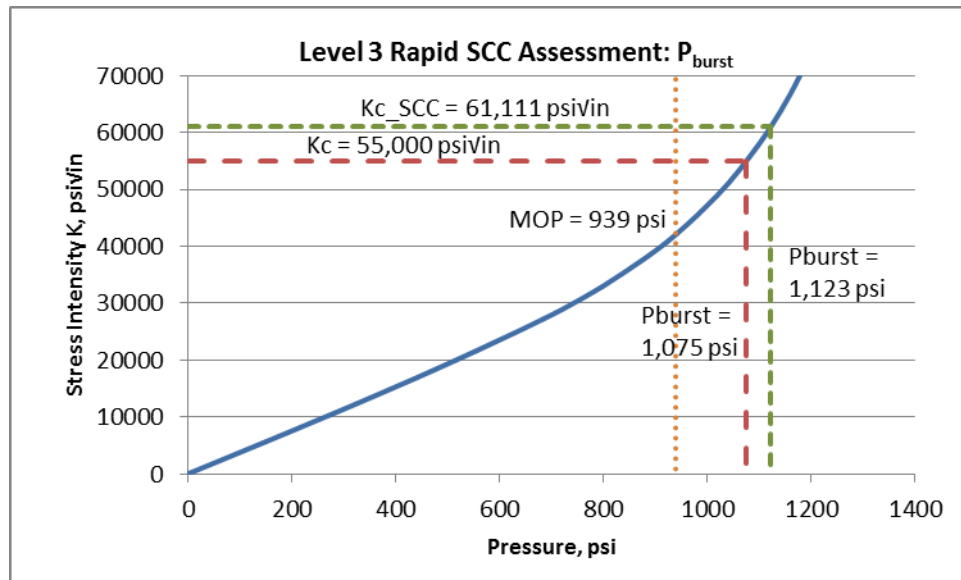


FIGURA 4. Grafica de K vs P para la anomalía evaluada en donde se muestra la Presión segura determinada.

4.3. Evaluación para la determinación de la vida útil remanente

Una vez que se ha determinado la presión de falla para una anomalía en particular, el siguiente paso es determinar cómo se comportara una grieta bajo diferentes escenarios o condiciones reales de operación. Para llevar a cabo esta determinación, Quest empleara el software propio conocido como PACIFICA® en el cual, los principales datos de entrada serán los provenientes de la base de datos de SCADA, el perfil de elevación, datos de inspecciones en línea, etc. Con los cuales, se llevará a cabo la determinación de la vida útil remanente de cada grieta en particular bajo condiciones de fatiga. La secuencia general de esta evaluación, se lista a continuación:

1. Introducir parámetros básicos de la tubería en el software (grado del acero, diámetro de la tubería, etc.).
2. Introducir condiciones de operación y ciclos de presión (MAOP, MOP, PO, etc.).
3. Ingresar al programa las características de la anomalía a evaluar, en este caso la profundidad y longitud de la(s) grieta(s) en cuestión.
4. Establecer los parámetros para el cálculo por fatiga (modelo de crecimiento y modelo de falla).
5. Analizar bajo condiciones reales o establecer un modelo idealizado de grieta.

6. Determinación de la vida útil remanente (en ciclos de presión) para la grieta evaluada.

Los resultados de esta evaluación en adición a los valores de presión de falla previamente determinados, permitirán al operador de ductos, determinar con mayor precisión el comportamiento futuro de grietas en función de los parámetros reales de operación bajo uno o múltiples posibles escenarios, como se muestra en la figura 5.

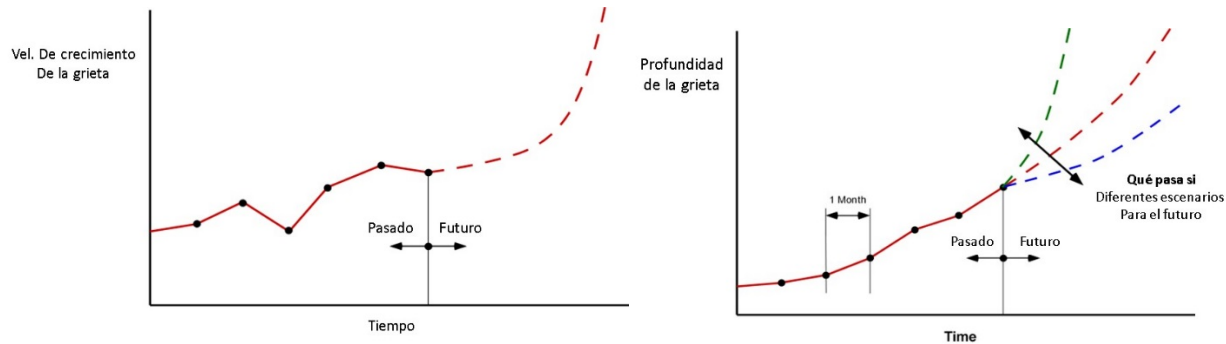


FIGURA 5. Comportamiento de una grieta en función del tiempo en A) su velocidad de crecimiento y B) su profundidad.

4.4. Beneficios obtenidos mediante la aplicación de la evaluación dinámica de grietas

Son múltiples los beneficios que se pueden obtener al utilizar una metodología que permitirá optimizar los recursos y reducir por ende los costos por mantenimiento y rehabilitación al permitir seleccionar de manera eficiente a través de un modelo científico incluido en los programas de evaluación ingenieril propuestos. A continuación se listan algunos de estos beneficios:

1. Evaluación con datos reales (obtenidos de mediciones directas en campo)
 - Reducción del nivel de conservatismo presente al trabajar con datos no medidos in situ.
 - Valores de presiones de falla y condiciones de aceptabilidad más representativos.
2. Creación de un modelo en 3D mediante el programa **FeaCrack®**
 - Obtener la respuesta de la grieta a la presencia del esfuerzo creado por la presión interna de cada grieta en particular.
 - Resultados de Evaluación más representativos
3. Determinación del tiempo de vida Útil remanente para cada grieta
 - Valor de presión segura para cada anomalía
 - Tiempo estimado de permanencia bajo las condiciones de operación de cada indicación.
4. Reparación de grietas que realmente ameriten reparación inmediata
 - Programar la reparación de todas aquellas grietas que bajo las condiciones actuales de operación no tengan dimensiones “críticas”. De acuerdo al cálculo del pronóstico de vida remanente, realizado con el programa **Pacifica®**.
 - Reducción en los costos de excavación y asociados.

- Se entregará toda la información que soporte la toma de decisiones tomadas respecto a la rehabilitación de este tipo de anomalías.

5. Llevar a cabo una mejor planeación respecto al mantenimiento a corto y mediano plazo de todas aquellas indicaciones que no requieran ser reparadas.

6. Se obtendrá una adecuada programación para el mantenimiento futuro de grietas.

- Se contará con el sustento científico para soportar solicitudes de presupuesto para este tipo de programas.

7. Garantizar la operación segura del Oleoducto de 30" bajo las condiciones requeridas de operación en presencia del SCC.

- Cambios de presión y/o flujo

5. Conclusiones

Debido a que los factores que propician la formación de grietas están siempre presentes en los ductos que transportan hidrocarburos, es esencial llevar a cabo programas continuos de mantenimiento preventivo que incluyan metodologías innovadoras como la propuesta, que permitan tomar decisiones con base al conocimiento científico existente respecto a la formación, crecimiento y remediación de este tipo de daños.

Dada la frecuencia de aparición y a las variantes que presenta el fenómeno de agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo, se requiere determinar todas aquellas anomalías cuyas condiciones pudieran volverse con el tiempo una amenaza para la integridad de los ductos que transportan hidrocarburos tanto líquidos como gaseosos.

La metodología propuesta permitirá determinar la presión de falla para cada anomalía evaluada, el tiempo de vida útil remanente, así como la condición actual de aceptabilidad bajo las condiciones actuales de operación en conjunto, estos resultados sustentaran la toma de decisiones respecto a la rehabilitación de grietas a corto, mediano y largo plazo.

6. Referencias

1. *Fitness-for-Service*, API 579/ASME FFS-1, API 579 2nd ed. Washington, DC, USA: The American Society of Mechanical Engineers, 2007.
2. *Signal Fitness-for-Service*TM software, Quest Integrity USA LLC, Boulder, CO, www.questintegrity.com.
3. *FEACrack*TM software, Quest Integrity USA LLC, Boulder, CO, www.questintegrity.com.
4. *Pacifica*TM software, Quest Integrity USA LLC, Boulder, CO, www.questintegrity.com.
5. Anderson T.L., "Pipeline Crack Assessment: New Technology versus Old-School Methods,".
6. Anderson, T.L., Brown, G.W., "Assessment of Stress Corrosion Cracking in 20-Inch Pipeline," Client Report, Quest Integrity USA LLC, Boulder, CO, 2014.
7. Wallin, K., "Fracture Toughness of Engineering Materials: Estimation and Application, Warrington UK, EMAS Publishing, 2011.
8. Anderson, T.L., "Development of a Modern Assessment Method for Longitudinal Seam Weld Cracks," PR-460-134506, Pipeline Research Council, International, Inc., January 2015.