**X CONFERENCIA INTERNACIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA “COMEC 2019”**

**Metodología de análisis de fallas de uniones soldadas en tuberías de transporte de hidrocarburos**

***Methodology of failure analysis of welded joints in hydrocarbon transport pipelines***

**Enrique Velázquez1, Alejandro Duffus2, Amado Cruz-Crespo3, Eduardo Díaz- Cedré 4, Alexis Maza Sánchez 5**

1- Enrique Velazquez Pérez. Centro de Investigaciones de Soldadura, UCLV, Cuba. E-mail: [evel@uclv.edu.cu](mailto:evel@uclv.edu.cu)

2- Alejandro Duffus Scott. Centro de Investigaciones de Soldadura, UCLV, Cuba. E-mail: [aduffus@uclv.edu.cu](mailto:aduffus@uclv.edu.cu)

3- Amado Cruz-Crespo. Centro de Investigaciones de Soldadura, UCLV, Cuba. E-mail: [acruz@uclv.edu.cu](mailto:acruz@uclv.edu.cu)

4- Eduardo Díaz- Cedré. Fabricación y Tecnología en Soldadura S.A de C.V, Querétaro, Qro, México. E-mail: [edcedre@fatesa.mx](mailto:edcedre@fatesa.mx)

5- Alexis Maza Sánchez. SOLTIINSA S.A., Nicaragua. E-mail: [amasa64@gmail.com](mailto:amasa64@gmail.com)

**Resumen:**

En el trabajo se propone una metodología de análisis de fallas de uniones soldadas en tuberías de transporte de hidrocarburos, basada en la inspección y la caracterización mediante ensayos destructivos y no destructivos. La aplicación de dicha metodología permite establecer el estado técnico de las instalaciones, aportando criterios para la toma de decisiones sobre la explotación segura, la inspección y reparación. Se presenta, un estudio de caso de un ducto de acero API X52 para el transporte de hidrocarburos. El estudio se enfoca a la uni’on de una secci’on con largo tiempo en servicio con una nueva, definiéndose la viabilidad de reparación por soldadura manual con múltiples pasadas.

**Palabras Clave:** Fallas en tuberías, Ensayos destructivos y no destructivos, Aceros API 5L.

**Summary:**

The work proposes a methodology for analysis of weld joints failures in hydrocarbon transport pipes, based on inspection and characterization by destructive and non-destructive tests. The application of this methodology allows to establish the technical state of the facilities, providing criteria for making decisions on the safe operation, inspection and repair. A case study of an API X 52 steel pipeline for the transport of hydrocarbons is presented. The study focuses on the union of a section with long time in service with a new one, defining the feasibility of repair by manual welding with multiple passes.

**Palabras Clave:** Fallas en tuberías, Ensayos destructivos y no destructivos, Aceros

API 5L.

Keywords: Failures in pipes, destructive and non-destructive tests, API 5L steels.

**Objetivo general:**

Presentar una metodología de análisis de fallas que contemple la inspección y caracterización del material de uniones soldadas en las tuberías que transportan hidrocarburos.

**Introducción**

El análisis de fallas en instalaciones y equipos juega un papel de extrema importancia para el funcionamiento bajo condiciones seguras de instalaciones y equipos. De manera general los códigos y normas contemplan los ensayos necesarios a realizar para la realización de dichos análisis sin embargo en muy pocos casos se define un orden lógico de la realización de los mismos; teniendo en consideración este aspecto es que se estableció por parte de nuestro grupo de trabajo de la metodología que en este trabajo ponemos a consideración.

En la actualidad el transporte de gas, petróleo y sus derivados, a través de tuberías, ocupa un lugar importante en el mundo [1]. En Cuba la explotación del petróleo y el gas es una de las áreas donde se observan resultados muy alentadores y en los últimos años se han introducido modernas tecnologías, a través de la asociación de la empresa cubana con capitales extranjeros.

. En los últimos tiempos, debido a la modernización industrial a que se ha visto sometida esta industria dentro de los convenios del “ALBA”, ha sido necesario someter a modificaciones las instalaciones originales, desviando, ramificando o montando nuevas

Como puede verse existe un incremento del sector energético derivado del petróleo. Esto ha provocado un aumento de las explotaciones, como son las plataformas petrolíferas u “off shore”, así como la utilización de conducciones cada vez más largas y con mayores presiones, como los gasoductos y oleoductos.

Ahora bien, tanto la [industria](http://www.monografias.com/trabajos16/industria-ingenieria/industria-ingenieria.shtml) del petróleo como la del gas, están sometidas a [riesgos](http://www.monografias.com/trabajos13/progper/progper.shtml) de toda especie, cuyo origen puede ser debido a deficiencias [técnicas](http://www.monografias.com/trabajos6/juti/juti.shtml), como las averías en los oleoductos; a causas naturales imprevisibles, como la incertidumbre en la prospección de los yacimientos, las tormentas en el mar y en [la tierra](http://www.monografias.com/trabajos15/origen-tierra/origen-tierra.shtml) o los [incendios](http://www.monografias.com/trabajos5/prevfuegos/prevfuegos.shtml); y también a [problemas](http://www.monografias.com/trabajos15/calidad-serv/calidad-serv.shtml#PLANT) políticos, económicos y comerciales, como las [crisis](http://www.monografias.com/trabajos11/mcrisis/mcrisis.shtml#QUEES) que afectan periódicamente las relaciones entre países productores y países consumidores.

Existen cuatro aspectos fundamentales para la correcta operación de un sistema de tuberías [2]:

1. Seguridad.
2. Abastecimiento continúo.
3. Eficiencia económica y
4. Cumplimiento de las leyes y regulaciones.

A pesar de las continuas mejoras implementadas en el aspecto de seguridad; específicamente en los procesos de supervisión e inspección, continúan ocurriendo accidentes y fallas, en gasoductos y oleoductos, ya sea debido a errores internos, (materiales, proceso de manufactura, diseño) o por interferencia externa (desastres naturales, excavaciones por terceras partes, sabotajes etc).

Partiendo del incremento de los kilómetros de tuberías construidos en Cuba en los últimos años, para el transporte de petróleo y sus derivados, a lo que se une la existencia de tuberías con más de 30 años de construidas en colaboración con el campo socialista y conociendo el riesgo de fallas, los mecanismos de daño que de ellas pueden desencadenarse y la falta de precisión sobre el orden de los ensayos, aspecto que puede ser observado en las principales normas internacionales que regulan una adecuada inspección de las tuberías, a lo que también se une no contar en todos los casos con el equipamiento necesario; es que se enfoca este trabajo.

**Desarrollo**

Para comenzar nuestro trabajo lo haremos dando la definición de falla.

**Falla:** Incapacidad, por alguna razón, de una parte o ensamblaje de ejecutar la función para la cual fue diseñada.

Durante años, el análisis de fallas ha sido un proceso que ha venido desarrollándose de muy diversas maneras, influenciado principalmente por la experiencia del especialista.

La ocurrencia de fallas, puede tener diversos orígenes, entre los cuales se pueden mencionar:

1.- Condiciones de servicio extremadamente severas

2.- Defectos del material base

3.- Desviaciones del proyecto original en el proceso de fabricación

4.- Diseño inadecuado

5.- Mala selección y manejo de los materiales bases y de soldadura.

6.- Dificultades en el montaje (montaje propiamente dicho, soldadura, tratamiento térmico).

7-Fenómenos de degradación estructural

8- Vandalismo.

En muchos casos el origen de la falla puede estar relacionado con una combinación de varios de los aspectos anteriormente mencionados.

* 1. ***Fallas más comunes en tuberías***

Entre las causas más comunes de fallas que provocan accidentes en tuberías conductoras de petróleo y derivados que se reportan en la literatura técnica, podemos encontrar las que se muestran en la Figura 1 Anexo 1.

* 1. ***Filosofía del análisis de fallas***

Los datos históricos recogidos sobre fallas catastróficas en barcos, aviones, puentes, sistemas de tuberías, calderas de vapor y otras estructuras de alta responsabilidad, han demostrado una estrecha interrelación entre la teoría y la práctica, de tal manera que actualmente es posible pronosticar determinadas fallas en instalaciones

Por tales razones, se puede afirmar que la filosofía a seguir en el diagnóstico y pronóstico de fallas consiste en proponer una metodología que pueda ser de utilidad, no solo en construcciones soldadas, sino en otras áreas de la ingeniería, y que con el conocimiento de las causas que los originan, generar las acciones correctivas para evitar que se vuelvan a presentar. Otros aspectos fundamentales de la FILOSOFIA DEL ANALISIS DE FALLAS consiste en prever la vida del equipo y/o componentes soldados, la periodicidad o política de inspección, las reparaciones a efectuar y la revitalización general de la instalación cuando sea necesario[3]

* + 1. ***Fallas a consecuencia de errores humanos***

Entre las causas más comunes de fallas podemos encontrar las producidas por errores humanos (la no señalización de los lugares por donde pasan las tuberías, la realización de excavaciones a ciegas, etc.), y por otro lado el efecto de la corrosión (en sus diferentes modalidades) sobre el espesor de la pared del tubo. Este último problema es sometido a estudio en muchos de los artículos referenciados.

**Errores de Fabricación.**

Cuando nos referimos a errores de construcción, estamos hablando del momento en que las láminas de aceros son fabricadas de tal manera que su composición química y propiedades mecánicas no cumplan con las normas y presenten bajo contenido en cuanto a elementos de aleación se refiere. En tal sentido entra a jugar un papel importante el estudio de la composición química del petróleo que se va a transportar, así como el medio donde esté situada la tubería.

**Factores de diseño.**

Dentro de los errores en los factores de diseño tenemos una mala selección del acero a emplear, el diámetro externo e interno, aplicando a la vez una mala selección del espesor de la tubería. Para evitar esto, es necesario siempre acudir a las normas internacionales para construcción de tuberías de petróleos como la API 5L.

**Defectos de Soldadura (errores de construcción).**

Los cordones de soldadura de oleoductos y gasoductos constituye una de las zonas críticas más susceptibles donde podría iniciarse la corrosión, debido a la presencia de entallas, defectos superficiales, inclusiones, heterogeneidades estructurales que lleva consigo la unión soldada, en estos casos resulta en extremo peligrosas aquellas heterogeneidades de forma alargada sean cuales quiera (socavaduras, falta de fusión en los bordes de la soldadura, falta de penetración, inclusiones de escoria etc.) y cuando se encuentran presentes en los ductos agua, ácido sulfhídrico, bióxido de carbono y alta presión de operación, tenemos el cuadro ideal para que se desarrolle el mecanismo de corrosión y agrietamiento por hidrógeno inducido [4,5].

Considerables son también las fallas a consecuencia de la soldadura tanto en la fase de fabricación como en la de reparación. Esto es significativo e indica la necesidad de abordar con más profundidad los fenómenos inherentes al proceso de soldadura, que pueden afectar la integridad de las tuberías. Se ha comprobado que la corrosión es el daño más influyente en las fallas. En el caso específico de Cuba, el 72,7 % de las averías que se han reportado, se debieron a la corrosión externa y el resto a las pérdidas de la hermeticidad en reparaciones temporales realizadas.

* + 1. ***Riesgos Externos***

Los riesgos externos se reducen a riesgos naturales y actividades de terceros: En el primero es de esencial importancia tener en cuenta y hacer un minucioso estudio geográfico del área donde el sistema de oleoducto será ubicado, la vegetación, el tipo de terreno (regular o irregular), sus pendientes, si atraviesa ríos o mares, entre otros. En el segundo riesgo, podríamos mencionar los sabotajes con un pequeño por ciento de protagonismo en las fallas de ductos pero no menos importante.

Estos riesgos deben ser tomados muy seriamente no sólo debido a las pérdidas económicas que se puedan originar, sino sobre todo a la posibilidad de generar pérdidas de vidas humanas y daños irreparables al medio ambiente. Corrosión en diferentes formas (interna, externa, bajo tensión), desastres naturales; como el paso del huracán Katrina, y daños originados por terceros, fueron algunas de las causas más frecuentes de accidentes [6].

* + 1. ***Fallas en las tuberías inducidas por el servicio***

Cuando una estructura se encuentra en servicio, está sometida a la acción de diferentes fuerzas y acciones agresivas provenientes del medio y del ambiente al que está expuesta, que deterioran su estado físico. Este deterioro puede ser:

Disminución de la resistencia del material, reducción de la sección transversal o del espesor de pared, aparición de grietas.

Así mismo, los diversos tipos de deterioro tienen como consecuencias:

Reducción en la capacidad de la estructura de soportar cargas, probabilidad de fallas inesperadas y catastróficas, reducción en la vida útil

En la práctica, existen muchos defectos y anomalías que afectan la resistencia de una estructura, pero si estos no crecen o se acumulan con el tiempo, el efecto será únicamente un riesgo de falla si eventualmente la carga de servicio se incrementa hasta igualar el valor de resistencia residual.

Las condiciones de servicio severo y la inestabilidad de las condiciones de operación, aumentan el grado de deterioro, reduciendo de manera muy importante la vida útil de los ductos.

***Fallas en tuberías debido a la corrosión.***

Como ya se ha mencionado, de todas las fallas que ocurren en las operaciones de la industria del gas y del petróleo la más importante es la corrosión. Esta se presenta en los materiales de diferentes maneras [7].

La corrosión a consecuencia del petróleo está relacionada con la presencia de compuestos de azufre y ácidos nafténicos. Esto ocurre principalmente por la presencia de gas sulfhídrico (HS) y azufre elemental. Los factores que influyen en esto están relacionados con el índice de acidez, velocidad, turbulencia, porcentaje de azufre, temperatura y estado físico de los petróleos[8,9,10].

Las formas de degradación estructural más comunes que acortan la vida útil de un ducto en este aspecto son:

- Corrosión localizada.

- Corrosión uniforme.

- Corrosión erosión.

- Agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos.

1. **Metodología de análisis de falla**

**2.1 Aspectos a considerar en la Recopilación de Información**

* ¿Existe evidencia de corrosión, o de algún material extraño en la superficie fracturada?
* ¿El esfuerzo era unidireccional o este revertía en dirección?
* ¿Se ha deformado la superficie de la pieza por cargas durante el servicio o por daño después de la fractura?
* ¿Existe evidencia de daño de la superficie de la pieza debido a manufactura, ensamble, reparación o servicio? Marcas de herramientas, daño por esmerilado, pobre soldadura, marcas de arco, corrosión desgaste, fatiga por picadura o “pitting”. Muchas fracturas se originan en la superficie de la pieza.
* ¿Existe alguna concentración de esfuerzo relacionada a la fractura?
* ¿Se espera que la pieza sea rígida o flexible?
* ¿Tiene la pieza un diseño apropiado?
* ¿Cómo trabaja la pieza y su ensamble?
* ¿Está la pieza dimensionalmente correcta? Coinciden las dimensiones con la información del plano?
* ¿Son las discontinuidades internas o concentraciones de esfuerzo las que pueden causar problemas?
* ¿Ocurrió la fractura en la soldadura o en la región afectada por el calor de la soldadura?
* Si la pieza fue tratada térmicamente, ¿fue el tratamiento térmico debidamente ejecutado?
* ¿Están las propiedades del material dentro de los rangos especificados? Si es así, ¿son las especificaciones apropiadas para la aplicación?
* ¿Son las propiedades físicas del material apropiadas para la aplicación? Coeficiente de expansión térmica, densidad, temperatura de fusión, conductividad térmica y eléctrica, etc.
* ¿Existe evidencia de que el mecanismo operó a excesiva velocidad o sobrecargado?
* ¿Existe evidencia que se abusó del mecanismo durante el servicio o utilizado bajo condiciones para las cuales no fue diseñado?
* ¿Recibió el mecanismo o estructura mantenimiento normal, con los materiales recomendados?
* ¿Cuál es la condición general del mecanismo?
* ¿Es candidato para disposición o es relativamente nuevo?
* Los problemas relacionados con el medio ambiente pueden surgir dondequiera de la historia de una pieza: fabricación, transporte, almacenamiento ensamble, mantenimiento y servicio
* ¿Qué reacciones químicas pueden haber tenido lugar en la pieza durante su historia? Corrosión rajadura por corrosión bajo esfuerzo.
* ¿Bajo qué condiciones térmicas ha estado sujeta la pieza durante su existencia? Elevadas temperaturas

En los pasos a seguir de la presente guía [11],es fundamental la caracterización del objeto de análisis en cuestión, es cotidiano que en la literatura aparezca la descripción detallada de las características de los materiales, sin embargo esto no ocurre así con sus propiedades las cuales no siempre se encuentran y cuando estas aparecen es frecuente que la información sea parcial.

Por otro lado, no es común encontrar en un mismo texto o artículo los métodos de caracterización de un determinado material. En ocasiones encontramos algunos métodos pero no siempre responden a los fenómenos de degradación que están ocurriendo en el mismo.

La figura 2 que se muestra en el anexo 2 resume los ensayos que permiten la adecuada caracterización del comportamiento del material así como su comportamiento ante las fallas que pueden presentarse en una instalación como la que nos encontramos analizando en el presente trabajo.

Desde el punto de vista científico, conocer los fenómenos de degradación en materiales y predefinir los métodos a aplicar es de gran importancia para el análisis de falla de un material, constituyendo una herramienta de trabajo para la toma de decisiones en la inspección y reparación. En la figura 3 anexo 3 se muestra la secuencia de pasos a seguir para la investigación y el de análisis de fallas, esta secuencia de pasos ordenados de forma metodológica permiten hacer un análisis escalonado en tres niveles.

Nivel I. En el mismo se lleva a cabo la recolección de los datos necesarios para desarrollar el análisis de las causas que dieron origen a la falla para esto es necesario tener en consideración las preguntas que se señalan en el epígrafe 2.1 de este trabajo, se advierte que la etapa inicial es fundamental para realizar un análisis adecuado, ya que en ella se documenta y coleccionan las evidencias de la falla.

Nivel II. En este se realizan los ensayos necesarios según los criterios de investigadores y especialistas involucrados en el análisis, no siempre es necesario realizar todos los ensayos que en este nivel se señalan sin embargo en él se plantean todos los que se consideran deben realizarse para cualquier caso que pueda presentarse [12,13,14,15,16,17].

Nivel III Después de la recopilación de información y la realización de los ensayos que a criterio de los investigadores y especialistas sean necesarios se procede entonces a determinar el mecanismo causante de la ocurrencia de la falla que se analiza en este paso se analiza el mecanismo de fractura se realizan pruebas en condiciones simuladas y se valoran las evaluaciones llegando a conclusiones y por último a establecer un reporte con sus correspondientes recomendaciones

**Conclusiones**

1. Las principales fallas que aparecen en las tuberías que transportan hidrocarburos son: corrosión, fatiga, agrietamiento inducido por hidrógeno, daño mecánico, fractura frágil, defecto de fabricación, defecto de soldadura, entre otras.
2. La metodología propuesta para el análisis de fallas de uniones soldadas en tubería contempla tres niveles: Un primer nivel donde se recopila información sobre la falla, un segundo que contempla los ensayos y un tercero donde se establece el mecanismo de la falla y vías de solución. El orden secuencial lógicos de la metodología brinda información para la toma de decisiones con el mínimo suficiente de ensayos y tiempo de análisis.
3. La metodología de análisis de fallas propuesta permite, mediante tres niveles de Inspección y a partir de un ordenamiento lógico secuencial, establecer las fallas presentes, definir los métodos de ensayos a aplicar y determinar el estado estructural. La aplicación de dicha metodología agiliza el análisis de falla para la toma de decisiones para el seguimiento en servicio y para la reparación.
4. Los ensayos contemplados en la metodología permiten realizar estudios integrales para el diagnóstico, tanto en tuberías en servicio, como de manera preventiva de caracterización de los materiales para ductos, incluidas situaciones de reparación de tuberías con largo tiempo en servicio.

***Bibliografía***

*1. Lines A.O.O.P, A.o.O.P.L. Lines,A.O.O:P, Association of Oil Pipes Lines 2004 [cited 2005 Extraido el 18 de Noviembre].*

*2. Cortés Ramón ; Rodríguez Regina; Capra. André, Caracterización de los aceros alonizados resistentes a la corrosión utilizados en la industria del petróleo. Revista Facultad de Ingeniería, U.T.A, 2004. Vol. 12,.*

*3. Duffus Scott, A., Tema I: introducción al conocimiento de los diferentes tipos de fallas, Facultad de Ingeniería, Especialidad de Proceso metalúrgicos de Manufactura. 1998.*

*4. Desjardins, G., Improved Data Quality Opens Way For Predicting Corrosion Growth and Severity. Pipeline and Gas Journal. . (2002).*

*5. Desjardins, G., Reliability Approach to Optimized Pipeline Integrity Planning Base on Probabilistic Assessment of Corrosion Rates and Future Corrosion Severity. Proceedings of the Sixth International Pipeline Rehabilitation and Maintenance Conference, Berlin, Germany. (2003, October).*

*6. Mendoza R.;Huante J.;Alanis M.; González- Rivera C;. y Juárez-Islas J.A., Evaluation of the Mechanical Properties and Corrosion Behavior of Ultra Clean steels. J. of Materials Processing Technology. 2000.*

*7. Biblioteca.unet, http:/biblioteca.unet.edu.ve/visitado en diciembre de 2008.*

*8. Corrosión disponible en http://es.Wilkipedia.org/wilkipetroleo. [cited; Available from: http://es.Wilkipedia.org/wilkipetroleo.*

*9. Cabrera Xiomara, Curso de Corrosión. 2007, Facultad de ing. Química UCLV: Santa Clara. Cuba.*

*10. Alfonso A, "Caracterización de los métodos de diagnóstico y control de la corrosión en los aceros inoxidables y sus uniones soldadas." Tesis de Doctorado, . 1992, UCLV: Santa Clara.*

*11. Duffus Scott alejandro, Curso TÉCNICAS BÁSICAS DEL ANÁLISIS DE FALLA. 2006: Universidad Central de Las Villas. Cuba.*

*12. CIDESI.:, Curso Internacional de Ensayos no Destructivos, ed. Q. CIDESI, México. 2007., Queretaro, Mexico.*

*13. ASME Code for Pressure Piping B31, Sección B31.4. Sistemas para la transportación por tuberías de hidrocarburos líquidos y otros líquidos:. 2004.*

*14. PEMEX, DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, INSPECCIÓN Y MANTENIMIENTO DE DUCTOS TERRESTRES PARA TRANSPORTE Y RECOLECCIÓN DE HIDROCARBUROS. 2003, 24 de junio de 2003. p. 115.*

*15. ASME, V Nondestructive Examination. ASME Boiler and Pressure Vessel Committee, Subcommittee on Nondestructive Examination, 2007.*

*16. American Petroleum Institute. API 5L, “Specification for Line Pipe”. 2000.*

*17. Duffus Scott A, “Metalografía de campo”. 2001, CIDESI, Mexico;Universidad Central de Las Vilas, Cuba: Queretaro, Mexico.*