
DETERMINACIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE UN OLEODUCTO EN SERVICIO

Determination of the lifespan of a Pipeline in Service

José Luis Soto Trinidad

Resumen: Este trabajo describe la realización de un estudio de predicción de vida de un oleoducto en servicio basado en las teorías y métodos de la mecánica de la fractura probabilística. La tubería es de acero con especificación APIL 5L, tiene un diámetro exterior de 203.2 mm y una longitud de 72 kilómetros. Para llevar a cabo el estudio se inspeccionó y analizó la superficie y las uniones soldadas del ducto utilizando un equipo de ultrasonido. En consecuencia, en la superficie del oleoducto se detectaron defectos, tales como grietas, socavaduras, oxidación y corrosión. Además se midió el espesor de la tubería. Entonces, a partir de los datos obtenidos de la medición de los defectos, presión, propiedades mecánicas y espesor remanente del oleoducto se determinaron las dimensiones de las grietas y la vida útil del mismo.

Palabras claves: Vida útil, defectos, velocidad de propagación y mecánica de la fractura.

Abstract: This paper deals with a study of life prediction of a pipeline in service based on the theories and methods of probabilistic fracture mechanics. The steel pipe is API 5L specification, has an outer diameter of 203.2 mm and a length of 72 kilometers. To conduct the study, the surface and pipeline welded joints were inspected and analyzed using ultrasound equipment. So, defects such as cracks, undercuts, oxidation and corrosion were detected on the surface of the pipeline. In addition, the thickness of the pipe was measured. Then, dimensions cracks and life were determined from the data obtained from the measurement data of the defects, pressure, mechanical properties and remaining thickness of pipe.

Keywords: Lifespan, defects, propagation velocity and fracture mechanics.

Introducción

En esta investigación se aborda un estudio de integridad estructural de una tubería de petróleo para determinar su vida útil y su confiabilidad estructural en servicio, por medio del uso de las teorías de la mecánica de la fractura probabilística. En este plantean las ecuaciones que conducen a obtener las variables de respuestas después del empleo de la técnica de ultrasonido para la identificación y evaluación de defectos a fin de tener los datos de entradas del estudio.

El oleoducto ha sido diseñado para transportar petróleo crudo desde una estación de bombeo hasta la Planta Principal, la cual está localizada a setenta y dos (72) kilómetros con respecto a la

estación mencionada. La presión de diseño de la tubería es de 9.928 MPa y cuenta con seis (6) válvulas de bloqueo distribuidas a lo largo para minimizar los daños en caso de derrame. Sus especificaciones son: 203.2 mm de diámetro exterior y el espesor de pared es de 5.563 mm para una especificación API 5 LX, Grado X-42, sin costura o soldadura por resistencia eléctrica.

En el estudio se tomó en cuenta la idea de que las grietas existentes en las partes de la estructura en servicio, pudieran crecer mientras esté en trabajo, lo que ha conducido a la frase descriptiva “diseño tolerante al daño”. El enfoque de la filosofía se concentra en el crecimiento de grietas hasta que este se vuelve crítico y la parte se retira del servicio, en este caso, la herramienta de análisis es la mecánica de la fractura lineal elástica (MFEL), la inspección y el mantenimiento son esenciales en la decisión de retirar partes antes de que la grieta alcance un tamaño catastrófico, tal como se ha hecho en los trabajos de reparación del ducto (Irwin, 1957) (Budynas y Nisbett, 2008). Por lo tanto, como la seguridad humana está involucrada, se han hecho inspecciones periódicas en busca de grietas (Askeland, D. & Phulé).

En el estudio, el uso de factores de concentración del esfuerzo proporciona una indicación de la carga promedio que se requiere sobre una parte para que ocurra la deformación plástica, o la fluencia; estos factores también son útiles para analizar las cargas sobre una parte que podrían causar fractura por fatiga (Shigley & Mischke, 1990). Al combinar el análisis de los cambios elásticos grandes en una estructura o parte que ocurren a medida que una grieta delgada crece, con mediciones de la energía que se requiere para producir nuevas superficies de fractura, es posible calcular el esfuerzo promedio (si no existieran grietas) que causaría el crecimiento de una grieta en una parte (Ferrer & Amigo, 2005). Tal cálculo, solamente, se permite en partes con grietas para las cuales se ha completado el análisis elástico y para materiales frágil (Smith & Javad, 2005). En el caso de la tubería que se analiza, es cilíndrica de pared delgada, por lo que constituye una aplicación

importante en el análisis de esfuerzo plano. Sus paredes oponen poca resistencia a la flexión, si puede suponerse que las fuerzas internas ejercidas sobre una parte de la pared son tangentes a la superficie del tubo, entonces, puede decirse que los esfuerzos resultantes están contenidos en un plano tangente a la superficie de dicho ducto (Bell & Johnson, 2007). También, se utilizará la ecuación de París para estudiar la predicción de vida dicho oleoducto porque correlaciona el crecimiento linealizado de cada una de las grietas que se originen en el mismo (Ferrer & Amigo, 2005), (González, 2004). A continuación se describe el procedimiento metodológico utilizado en el estudio y, posteriormente, los resultados obtenidos.

Procedimiento experimental

En este estudio de integridad basado en la mecánica de la fractura, se ha hecho un análisis de esfuerzos fundamentado en recipientes de pared delgada, el cual se limita al de recipientes cilíndricos (Martínez, et al., 2000), (Erdogan, 2000). Por lo tanto, se consideró el oleoducto como un recipiente cilíndrico de radio interior r y espesor de pared e , que contiene el fluido (*petróleo*) a presión. Considerando que se ejercen esfuerzos sobre un pequeño elemento de pared con lados respectivamente paralelos y perpendiculares al eje de la tubería. Estos esfuerzos normales σ_1 y σ_2 son los esfuerzos principales (Irwin, 1957). El esfuerzo σ_1 se conoce como esfuerzo de costilla y el esfuerzo σ_2 es el esfuerzo longitudinal (Bell & Johnson, 2007). Para determinar los esfuerzos de costilla σ_1 se hizo la suposición de separación de una porción del recipiente y su contenido se limitó por el plano xy y por dos planos paralelos al plano yz con una distancia Δx de separación entre ellos. Las fuerzas paralelas al eje z que estaban actuando en el cuerpo libre así definido, consisten en las fuerzas internas elementales $\sigma_1 dA$ en las secciones de pared y en las fuerzas de presión elementales $p dA$ ejercidas sobre la porción de fluido. Donde p es la presión manométrica del fluido, que representa

el exceso de la presión interior sobre la presión atmosférica exterior. Entonces, la resultante de las fuerzas internas $\sigma_1 dA$ es igual al producto de σ_1 y del área transversal $2e\Delta x$ de la pared, mientras que la resultante de las fuerzas $p dA$ es el producto de p y el área $2r\Delta x$. Escribiendo la ecuación de equilibrio, se tiene:

$$\sum F_z = 0: \sigma_1 (2e\Delta x) - p(2r\Delta x) = 0 \rightarrow ec. (1)$$

Resolviendo para el esfuerzo de costilla σ_1

$$\sigma_1 = \frac{pr}{e} \rightarrow ec. (2)$$

Para determinar el esfuerzo longitudinal (σ_2) se hizo un corte perpendicular al eje x y se consideró el cuerpo libre que consta de la parte del recipiente y de su contenido a la izquierda de la sección. Las cargas que están actuando en este cuerpo libre son las fuerzas internas ($\sigma_2 dA$) en la sección de pared y la presión ($p dA$) ejercida sobre la porción de fluido. El área de la sección de fluido es πr^2 , la circunferencia del cilindro ($2\pi r$) por su espesor de pared (e) se han agrupado en una ecuación de equilibrio (ec. 3) (Bell & Johnson, 2007):

$$\sum F_x = 0: \sigma_2 (2\pi r e) - p(\pi r^2) = 0 \rightarrow ec. (3)$$

Y despejando para el esfuerzo longitudinal σ_2 :

$$\sigma_2 = \frac{pr}{2e} \rightarrow ec. (4)$$

Asimismo, se sabe que este estudio implica la evaluación del número de ciclos del crecimiento de grietas hasta la fractura N_c . Por consiguiente, el número de ciclos total del servicio de la tubería hasta la rotura (N_t), abarca los ciclos de la iniciación de la grieta (N_g), y los ciclos de su crecimiento (N_c), de donde se tiene el siguiente modelo matemático (Ferrer & Amigo, 2005):

$$N_t = N_g + N_c \rightarrow ec. (5)$$

El análisis por separado requerido para la iniciación y el crecimiento de una grieta se debe al diferente nivel de tensión en la superficie de entalla, antes y después de iniciarse una fisura σ_f y σ_{fg} . Entonces, el modelo aplicable para evaluar la tenacidad a la fractura desde antes de iniciarse cualquier grieta se describe con la ecuación 6 (Ferrer & Amigo, 2005):

$$\Delta K = F_f \cdot \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \rightarrow ec. (6)$$

Esta ecuación involucra la tensión a que se somete el ducto (σ) en cada parte, la longitud de la grieta (a) y un factor geométrico que depende de la ubicación del defecto (F_f).

En el caso de para la predicción de vida del oleoducto se ha establecido la correlación analítica de cada una de las grietas que se manifiesten en este, por lo tanto, para obtener la solución de esta problemática se aplicó el modelo matemático de París debido a que correlaciona el crecimiento linealizado de una grieta en la etapa II con la pendiente n . Esta etapa II, ubicada entre la etapa I (crecimiento estable rápido) y la etapa III (crecimiento inestable y rápido), es justificada por la teoría de fatiga (Ferrer & Amigo, 2005), (González, 2004).

$$da/dN = C(\Delta K)^n \rightarrow ec. (7)$$

Donde los factores C y n , son parámetros característicos del material y del entorno considerado, y dependen de la relación $R_f = \sigma_{min}/\sigma_{max}$. Luego, se integra la ecuación de París para calcular el número de ciclos entre dos estados en el proceso de crecimiento de la grieta de fatiga; de esta manera, queda implícito el concepto de límite de fatiga que corresponde a los valores de $\Delta K < \Delta K_{IS}$ donde inicia la grieta (ΔK_{IS}), por debajo del cual no existe formación de grieta de fatiga y se determina el crecimiento inestable de una grieta (ΔI_C) (Ferrer & Amigo, 2005).

Por último, se evaluaron los resultados experimentales obtenidos por el análisis de ultrasonido (Ferrer & Amigo, 2005) y determinísticos a través de métodos y herramientas estadísticas y de probabilidad para encontrar las funciones de distribución a que mejor se ajustan (Walpole & Myers, 1992), (Mendenhall & Sincich, 1997) y mediante el programa @Risk Palisade Corporation (2002) hallar la función de supervivencia o la probabilidad de que la tubería estudiada no se fracture bajo las condiciones de servicio en que ha estado operando.

Resultados y discusiones

Los resultados del estudio de la mecánica de la fractura probabilística (MFP) realizado al Oleoducto, se presentan a continuación.

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS POR ULTRASONIDOS EN EL DUCTO

En la figura N.º 1, se muestra la realización de la medición de defectos y el espesor del Oleoducto.



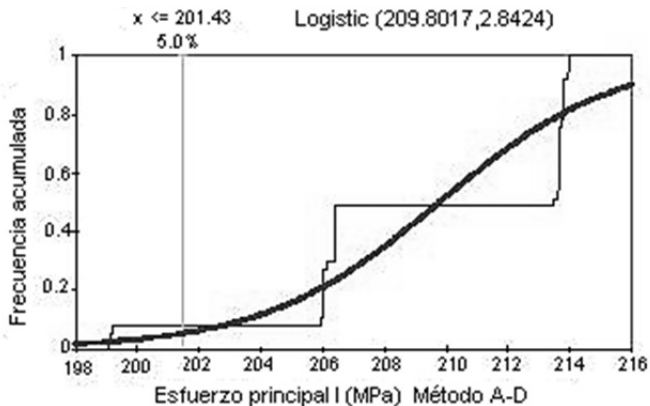
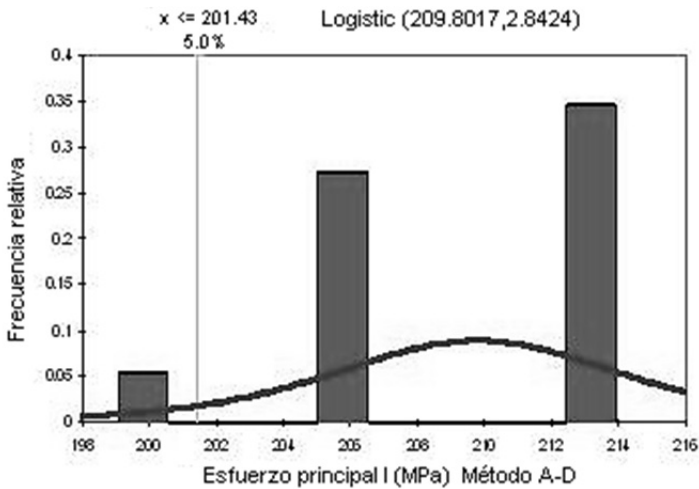
Figura N.º 1 - Medición de defectos y espesor del oleoducto de Ø 8 con un estudio por ultrasonido.

Los datos de las lecturas de los defectos, grosor y características en diferentes partes de la tubería (figura N.º 1), se presentan en la tabla N.º 1. La presión de diseño (P_d) de esta es de 9.928 MPa.

Tabla N.º 1
Resultados obtenidos por análisis de ultrasonido en el Oleoducto

Longitud tubo con defecto (m)	Profundidad del defecto (mm)	Espesor remanente de pared (mm)	Longitud del defecto (mm)	Ancho del defecto (mm)	Espesor de Pared (mm)
9.187	1.58	4.14	268	140	5.72
12.273	1.38	4.34	482	183	5.72
12.599	1.38	4.34	185	65	5.72
12.670	1.38	3.95	205	140	5.33
12.223	1.38	3.95	325	54	5.33
12.692	2.37	3.16	398	129	5.53
12.629	1.58	3.95	165	118	5.53
12.803	1.97	3.36	465	226	5.33
12.730	1.58	3.95	350	108	5.53
12.652	1.78	3.55	845	140	5.33
11.836	1.39	4.14	243	151	5.53
12.317	1.58	3.75	200	151	5.33
12.457	1.39	4.14	915	161	5.53
12.423	1.39	4.14	385	97	5.53
12.599	1.58	3.75	213	129	5.33
12.341	1.58	3.75	513	129	5.33
12.508	1.58	3.75	232	97	5.33
12.891	2.17	3.16	242	172	5.33
5.702	1.58	3.95	292	65	5.53
12.703	1.58	3.95	338	172	5.53
13.414	1.78	3.55	762	204	5.33
1.528	1.39	4.14	172	129	5.53
12.925	1.39	4.14	397	204	5.53
12.685	1.39	4.14	885	129	5.53
12.655	1.38	3.95	305	323	5.33
12.667	1.58	3.95	238	194	5.53
13.235	1.78	3.55	190	75	5.33
13.159	1.58	3.75	725	194	5.33
12.990	1.38	3.95	357	97	5.33
12.745	1.39	4.14	250	129	5.53
12.295	1.38	3.95	772	226	5.33
12.548	1.58	3.95	970	215	5.53
7.737	1.78	3.75	2205	312	5.53
12.528	1.38	3.95	197	215	5.33
12.971	1.58	3.75	478	258	5.33
12.271	1.38	3.95	273	183	5.33
12.409	1.38	3.95	752	280	5.33

Los esfuerzos ejercidos sobre el ducto debido a la simetría axial de dicho recipiente y de su contenido muestran que no se ejercen esfuerzos cortantes sobre el elemento de acuerdo a teoría del esfuerzo plano (Irwin, 1957) (Bell & Johnson, 2007). Los esfuerzos normales σ_1 y σ_2 presentados en la tabla N.º 2, son los esfuerzos principales que se determinaron. El esfuerzo σ_1 es la tensión máxima de trabajo, que se conoce como esfuerzo de costilla, y el esfuerzo σ_2 es el esfuerzo longitudinal, ambos esfuerzos influyen en el comportamiento mecánico del oleoducto y se describen por la distribución de probabilidad logística obtenida mediante el programa @Risk Palisade Corporation (2002) (figura N.º 2).



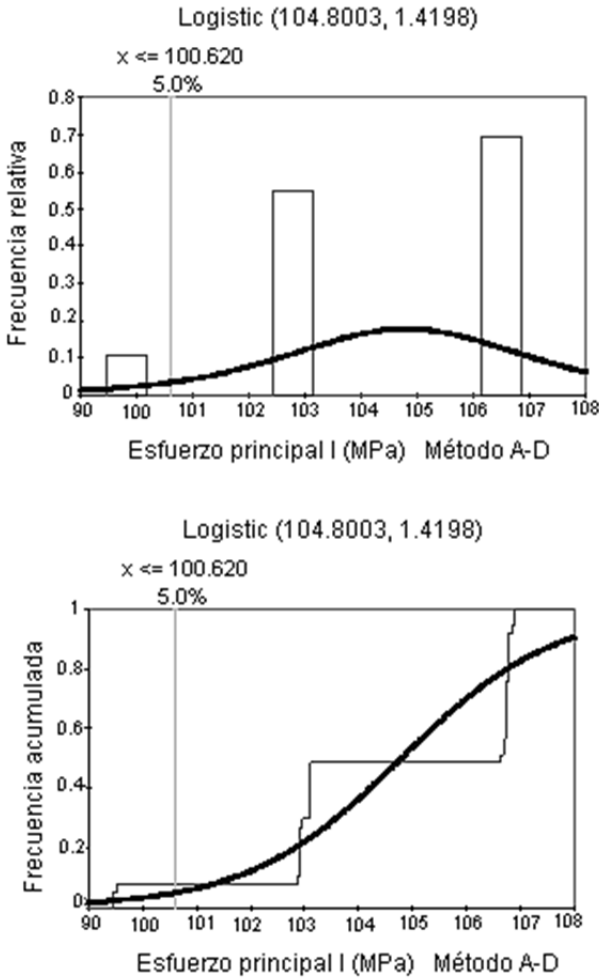


Figura N.º 2

Distribución logística de los esfuerzos que actúan en el Oleoducto

Las fuerzas que actúan en el oleoducto son las fuerzas internas $\sigma_2 dA$ en la sección de pared y las fuerzas de presión $p dA$ ejercidas sobre el fluido (Bell & Johnson, 2007). El área de la sección de fluido es πr^2 y circunferencia $2\pi r$ del cilindro por su espesor de pared e , da el equilibrio planteado por la ecuación 8. Entonces, el esfuerzo cortante máximo en la pared que se ajusta al comportamiento de una distribución logística (figura N.º 2), es igual al radio

del círculo del diámetro y corresponde a una rotación de 45° alrededor de un eje longitudinal y fuerza del plano de esfuerzo, es decir, dicha tensión cortante es igual al esfuerzo longitudinal.

Utilizando los datos de la tabla N.º 1 y sustituyéndolos en las ecuaciones 2 y 4 respectivamente, se calcularon los esfuerzos principales que inciden en el ducto con respecto a las presiones presentadas en cada zona; los resultados se muestran en la tabla N.º 2. El espesor remanente de la tubería es el mismo que se utilizó en los cálculos de estas tensiones.

Tabla N.º 2
Valores de los esfuerzos que se presentan
en las zonas con defectos del Oleoducto

Long. Tubo con defecto (m)	Presión (MPa)	Esfuerzo principal I (MPa)	Esfuerzo principal II (MPa)	Esfuerzo medio (MPa)	Tensión diseño (MPa)
9.187	7.902	199.227	99.518	149.373	250.325
12.273	8.277	199.081	99.445	149.263	238.790
12.599	8.277	199.081	99.445	149.263	238.790
12.670	8.084	213.628	106.712	160.170	262.366
12.223	8.084	213.628	106.712	160.170	262.366
12.692	6.235	205.972	102.887	154.430	327.958
12.629	7.796	206.011	102.907	154.459	262.366
12.803	6.872	213.473	106.634	160.053	308.437
12.730	7.796	206.011	102.907	154.459	262.366
12.652	7.275	213.911	106.853	160.382	291.929
11.836	8.185	206.367	103.085	154.726	250.325
12.317	7.679	213.734	106.765	160.249	276.359
12.457	8.185	206.367	103.085	154.726	250.325
12.423	8.185	206.367	103.085	154.726	250.325
12.599	7.679	213.734	106.765	160.249	276.359
12.341	7.679	213.734	106.765	160.249	276.359
12.508	7.679	213.734	106.765	160.249	276.359
12.891	6.466	213.588	106.692	160.140	327.958
5.702	7.796	206.011	102.907	154.459	262.366

Long. Tubo con defecto (m)	Presión (MPa)	Esfuerzo principal I (MPa)	Esfuerzo principal II (MPa)	Esfuerzo medio (MPa)	Tensión diseño (MPa)
12.703	7.796	206.011	102.907	154.459	262.366
13.414	7.275	213.911	106.853	160.382	291.929
1.528	8.185	206.367	103.085	154.726	250.325
12.925	8.185	206.367	103.085	154.726	250.325
12.685	8.185	206.367	103.085	154.726	250.325
12.655	8.084	213.628	106.712	160.170	262.366
12.667	7.796	206.011	102.907	154.459	262.366
13.235	7.275	213.911	106.853	160.382	291.929
13.159	7.679	213.734	106.765	160.249	276.359
12.990	8.084	213.628	106.712	160.170	262.366
12.745	8.185	206.367	103.085	154.726	250.325
12.295	8.084	213.628	106.712	160.170	262.366
12.548	7.796	206.011	102.907	154.459	262.366
7.737	7.405	206.113	102.958	154.535	276.359
12.528	8.084	213.628	106.712	160.170	262.366
12.971	7.679	213.734	106.765	160.249	276.359
12.271	8.084	213.628	106.712	160.170	262.366
12.409	8.084	213.628	106.712	160.170	262.366

A partir de los datos de las tablas 1 y 2, empleando la ecuación seis, se calcularon los tamaños de grietas y con la ecuación siete se determinó la velocidad de propagación de las mismas, la cual dio lugar al cálculo de la vida del ducto en ciclos a partir de una grieta empleando la ecuación 5. La avería se detectó por el análisis de ultrasonido; cuya dimensión es de $a_i = 0.019m$. Los valores de los tamaños y velocidad de propagación de las grietas así como su duración se presentan en la tabla N.º 3.

Tabla N.º 3 - Valores de vida, tamaño y velocidad de propagación de grietas en el Oleoducto

Longitud Tubo con daño (m)	Factor de intensidad esfuerzo ΔKI (MPa)	da/dN mm/ciclos	Grieta máxima a_c (m)	Grieta mínima a detectar a_{min} (m)	Último ciclo de vida (ciclos)	Vida útil (ciclos)
9.187	54.587	0.000008	0.023	0.015	3062.746	7921.601
12.273	54.547	0.000008	0.023	0.016	3092.288	6169.604
12.599	54.547	0.000008	0.023	0.016	3092.288	6169.604
12.670	58.533	0.000010	0.020	0.013	673.403	6128.409
12.223	58.533	0.000010	0.020	0.013	673.403	6128.409
12.692	56.435	0.000009	0.022	0.008	1825.399	17113.366
12.629	56.446	0.000009	0.022	0.013	1818.865	7901.596
12.803	58.490	0.000010	0.020	0.010	694.492	11966.974
12.730	56.446	0.000009	0.022	0.013	1818.865	7901.596
12.652	58.610	0.000010	0.020	0.011	635.323	9771.166
11.836	56.543	0.000009	0.021	0.015	1759.855	6131.650
12.317	58.561	0.000010	0.020	0.012	659.182	7862.983
12.457	56.543	0.000009	0.021	0.015	1759.855	6131.650
12.423	56.543	0.000009	0.021	0.015	1759.855	6131.650
12.599	58.561	0.000010	0.020	0.012	659.182	7862.983
12.341	58.561	0.000010	0.020	0.012	659.182	7862.983
12.508	58.561	0.000010	0.020	0.012	659.182	7862.983
12.891	58.522	0.000010	0.020	0.008	678.881	14389.136
5.702	56.446	0.000009	0.022	0.013	1818.865	7901.596
12.703	56.446	0.000009	0.022	0.013	1818.865	7901.596
13.414	58.610	0.000010	0.020	0.011	635.323	9771.166
1.528	56.543	0.000009	0.021	0.015	1759.855	6131.650
12.925	56.543	0.000009	0.021	0.015	1759.855	6131.650
12.685	56.543	0.000009	0.021	0.015	1759.855	6131.650
12.655	58.533	0.000010	0.020	0.013	673.403	6128.409
12.667	56.446	0.000009	0.022	0.013	1818.865	7901.596
13.235	58.610	0.000010	0.020	0.011	635.323	9771.166
13.159	58.561	0.000010	0.020	0.012	659.182	7862.983
12.990	58.533	0.000010	0.020	0.013	673.403	6128.409
12.745	56.543	0.000009	0.021	0.015	1759.855	6131.650
12.295	58.533	0.000010	0.020	0.013	673.403	6128.409
12.548	56.446	0.000009	0.022	0.013	1818.865	7901.596
7.737	56.473	0.000009	0.022	0.012	1801.961	9834.732
12.528	58.533	0.000010	0.020	0.013	673.403	6128.409
12.971	58.561	0.000010	0.020	0.012	659.182	7862.983
12.271	58.533	0.000010	0.020	0.013	673.403	6128.409
12.409	58.533	0.000010	0.020	0.013	673.403	6128.409

En la predicción de vida remanente del ducto, una de las aplicaciones de mayor impacto de la mecánica de fractura es la predicción de la vida útil, que explica que cuando una grieta en dicho oleoducto se propaga, la resistencia disminuye hasta que dicha tubería no pueda resistir la carga de trabajo y falle (Ferrer & Amigo, 2005), (González, 2004), esto se muestra en la figura N.º 3. Por lo tanto, la posibilidad que brinda la mecánica de fractura de predecir la rapidez de propagación de una grieta, es precisamente lo que hace que la predicción de vida sea posible (Shigley & Mischke, 1990). Por ende, para predecir la vida de ducto, se determinó que una de las grietas detectadas ha de crecer (ecuación 8), desde su tamaño detectado hasta su tamaño crítico, es decir de su vida remanente, además se estudió su rapidez de propagación durante el servicio (Erdogan, 2000).

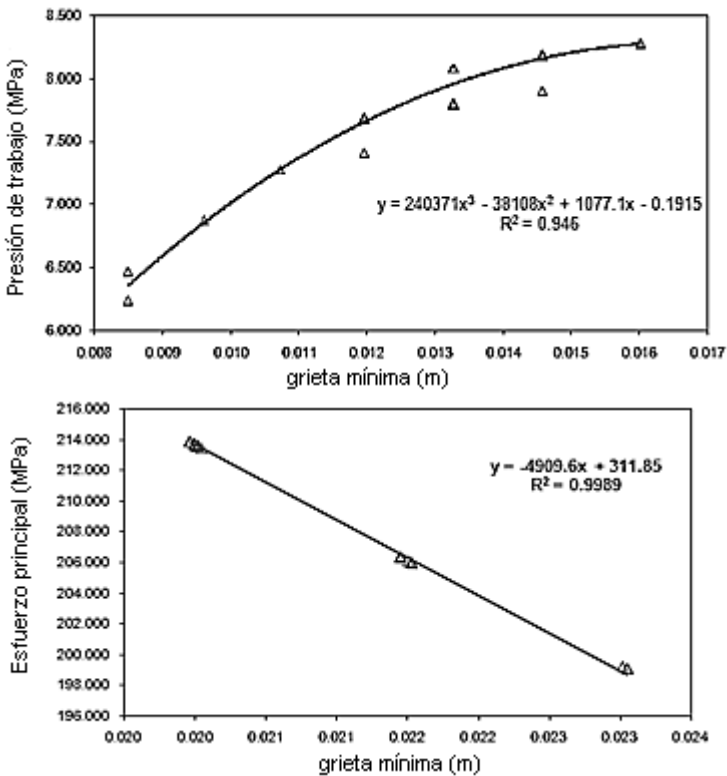


Figura N.º 3 - Grietas mínima y crítica que se pueden originar bajo la presión de trabajo en el Oleoducto

Un análisis de la figura N.º 3 permite conocer otros aspectos relevantes de la predicción de vida de la tubería, el ducto fue diseñado bajo la suposición de que el material no contenía defectos y la resistencia de diseño está determinada por las propiedades mecánicas de los materiales de fabricación y las características geométricas de dicho componente (Budinski, 1992), (Mangonon, 2001). De acuerdo a Ferrer & Amigo (2005) cuando aparece una grieta, inicialmente esta no tiene un efecto en la resistencia residual, pero a medida que la grieta crece, la resistencia va disminuyendo (Fig. 3b). El tamaño de grieta que disminuye la resistencia por debajo del nivel de diseño es el tamaño mínimo detectado mediante el análisis (González, 2004) (Fig. 4).

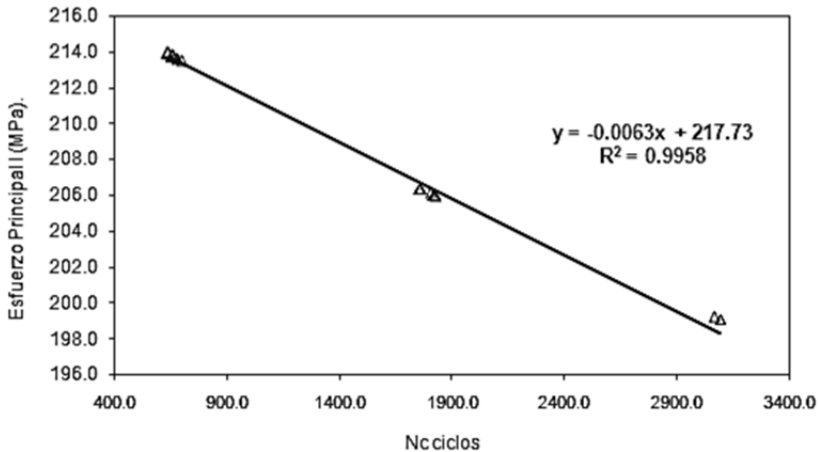
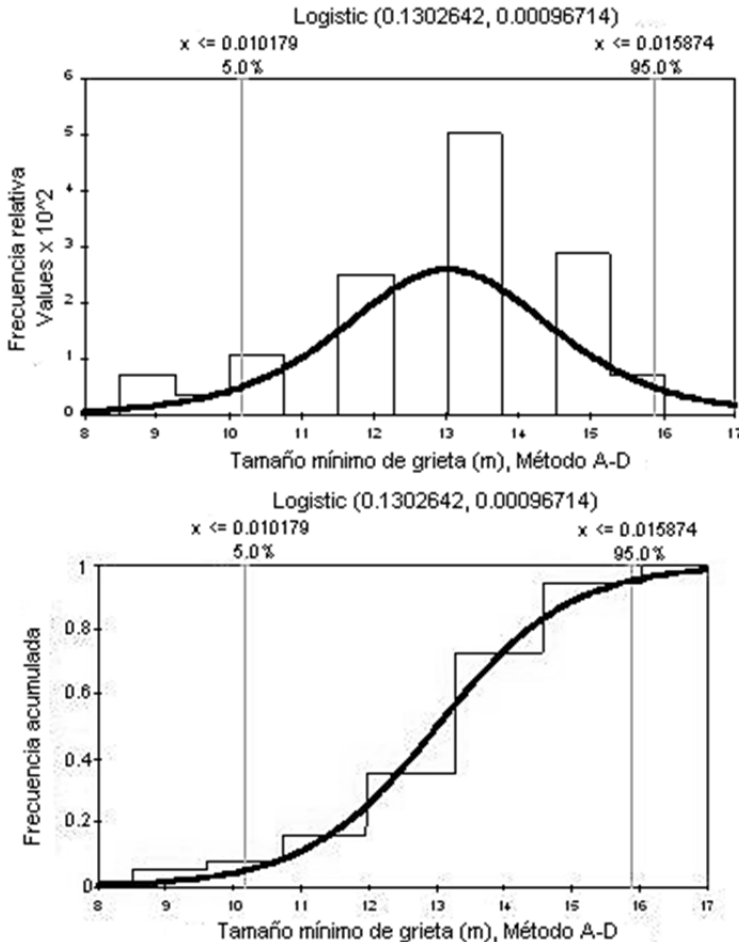


Figura N.º 4 - Tensión de trabajo Vs la vida del Oleoducto

A partir del tamaño mínimo a detectar y del tamaño crítico se obtuvo la vida útil del tubo, o sea, su vida máxima de operación. La vida remanente se interpreta como el tiempo que ha tardado en crecer la grieta desde el tamaño detectado en la inspección hasta el tamaño crítico (Anderson, 1995) (Fig. 3b). Sin embargo, puede ser que la posibilidad de fin de vida de operación, sea cuando la resistencia del material disminuya por efecto del servicio hasta quedar debajo de los niveles normales de operación, como muestra la figura N.º 4 (González, 2004). En este caso, la vida útil es determinada por el

tiempo en que la resistencia del tubo disminuye desde su valor inicial hasta igualar el nivel normal de operación, cuyos valores se muestran en la tabla N.º 3. La predicción de la vida útil en este caso, es más complicada por la dificultad de predicción de la rapidez de degradación de las propiedades del material –ya que las especificaciones de fabricación indican las propiedades mínimas requeridas y los materiales siempre poseen una resistencia mayor que el mínimo especificado (González, 2008). Las grietas desde su tamaño mínimo predictivo hasta su mayor tamaño presentan un comportamiento mecánico regido por una curva de distribución logística tal como se muestra en la figura N.º 5.



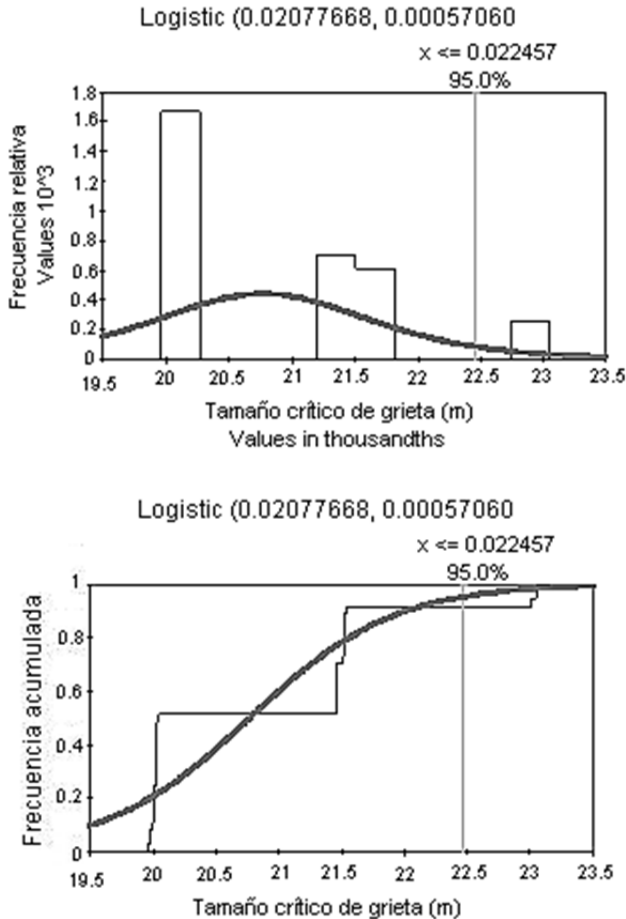


Figura N.º 5 - Distribución logística que muestra el comportamiento de tamaños de grietas del Oleoducto

En general, las curvas que muestran el comportamiento de la resistencia residual tienden a disminuir su pendiente a mayor tamaño de grieta. Esto hace que si al detectar una grieta se opta por la disminución de la carga, por ejemplo, en 50%, el incremento en la vida remanente es del mismo orden, mientras que si la curva de resistencia residual se eleva 25%, la vida aumenta 100% (González, 2004). Además de esta diferencia, la reducción de la

carga puede significar fuertes pérdidas por la disminución de la capacidad de producción. Por ende, los esfuerzos para la extensión de vida deben ir dirigidos al reforzamiento o uso de mejores materiales (Budinski, 1992).

En un análisis por separado para la iniciación y el crecimiento de la grieta se justifica por el diferente nivel de la tensión en el fondo de entalla antes y después de iniciarse la fisura, σ_f y σ_{fg} (Buckley, 2005), (Orowan, 1948). Se ha estudiado mucho la velocidad de propagación de la grieta encontrándose correlación con el incremento del factor multiplicador de tensiones, ΔK_I entre los estados extremos del esfuerzo aplicado al ducto (Ferrer & Amigo, 2005) (Figura N.º 6).

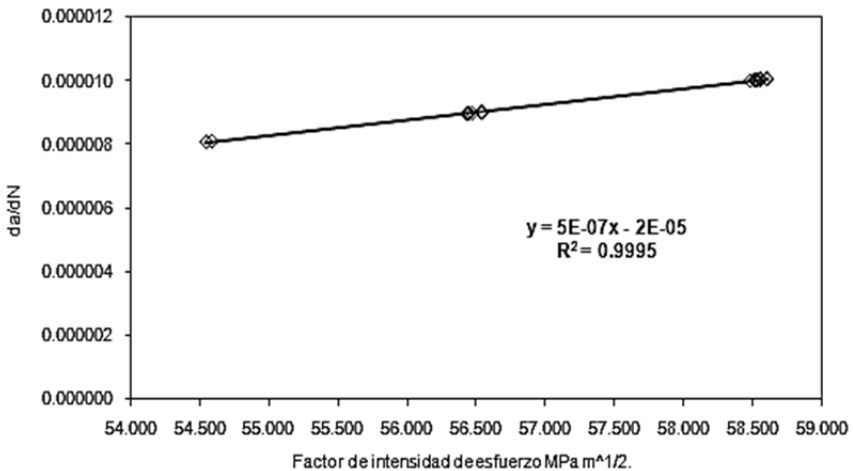


Figura N.º 6 - Tenacidad a la fractura vs vida del Oleoducto

La rapidez de propagación de las grietas presentes en el Oleoducto tiene un comportamiento descrito por la curva de distribución logística; la curva de densidad de probabilidad y de distribución acumulada correspondientes a dicha velocidad de propagación se muestra en la figura N.º 7.

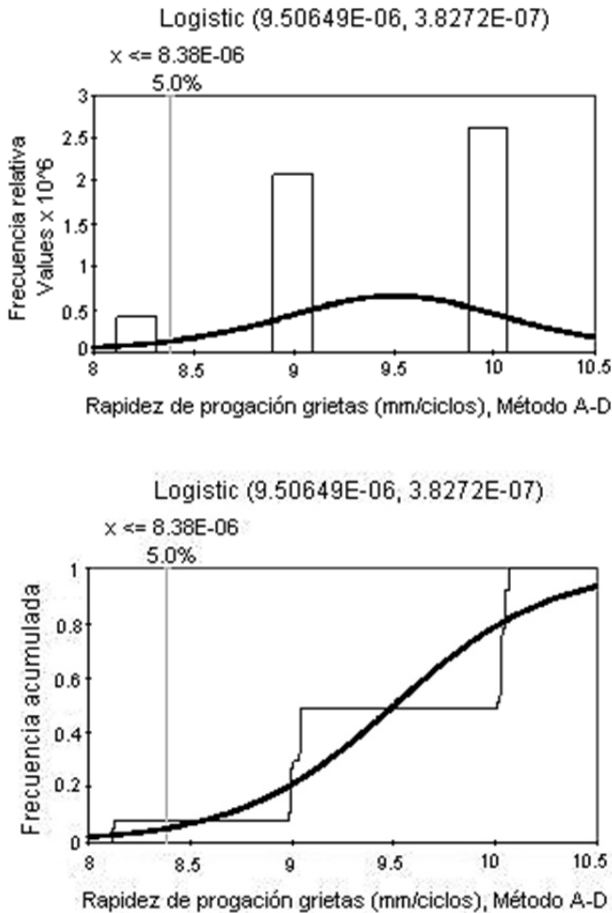


Figura N.º 7 - La rapidez de propagación de grietas en el Oleoducto presenta una curva de distribución logística

Por otro lado, el modelo matemático de París ($da/dN = C(\Delta K)^n$), correlaciona el crecimiento linealizado de cada grieta del oleoducto, etapa II, con la pendiente n . La etapa II queda entre la I, como crecimiento estable rápido, y la III, de crecimiento inestable y rápido que se ha justificado en la teoría de fatiga. La integración de esta ecuación permite el cálculo del número de ciclos entre dos estados en el proceso de crecimiento de la grieta de fatiga (Ferrer & Amigo, 2005). En la figura N.º 6 queda implícito el concepto

de límite de fatiga que corresponde a los valores de $\Delta K < \Delta K_{IS}$. Como el cálculo de los ciclos de fatiga (vida) de la figuras 4 y 6, hasta la fractura se realizó por integración de la ecuación de París entre los valores: En el caso de la vida final del ducto: (a) dimensión inicial de la grieta, a_0 , y (b) la dimensión final a_c , equivalente a la tenacidad estática del material K_{IC} , y en el caso de la vida útil de la tubería, el cálculo se realizó con las dimensiones de la grieta mínima a_{min} y la grieta crítica a_c , respectivamente.

Conclusiones

Debido a que el oleoducto está en servicio, está sometido a la acción de fuerzas y acciones agresivas provenientes tanto de las cargas de servicio como del ambiente, su estado físico se deteriora conduciendo a la disminución de la resistencia del material de que está hecho, pérdida de material de la sección transversal o del espesor y la aparición de defectos como socavaduras lo que puede reducir su la vida útil.

Cuando se detecta una grieta, la vida remanente de un oleoducto puede ser extendida de dos maneras: una es reduciendo la carga de servicio, lo cual hará que el tamaño crítico de grieta aumente, alargando la vida de dicho tubo; la otra es incrementando la resistencia del material o insertando un refuerzo, lo que eleva la curva de resistencia residual y hace que el tamaño crítico de grieta aumente. Para que se reduzca la vida útil, se requiere que el daño sea acumulativo, es decir, que aumente a través del tiempo. La rapidez de deterioro del ducto en servicio; por lo general, la acumulación de daño es inicialmente rápida por el hecho de ser una tubería grande y soterrada, por lo que las formas de daño tendrán uno o varios efectos adversos, siendo los más significativos la reducción de la vida útil y la reducción de la capacidad de carga de trabajo, ya que la disminución de la capacidad de carga de servicio sin señales evidentes o detectables es la causa, en muchos casos, de fallas o averías inesperadas.

Por medio de este análisis de integridad se determinó la tensión máxima que puede resistir el ducto a un mínimo espesor donde la fluencia no afecta el estado de la estructura y la magnitud del daño tolerable para el cual se calculó la presión, las tensiones y el tamaño de las grietas iniciales y críticas, establecido a partir de estas la vida útil del oleoducto. Asimismo, se vio que los parámetros de resistencias de integridad del oleoducto muestran un comportamiento descrito por una distribución logística. Sin embargo, el deterioro superficial causado por las cargas de trabajo en dicho componente presenta un comportamiento regido por una función de distribución log-logística.

Referencias bibliográficas

- Anderson, T. L. (1995). *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*. New York: CRC Press.
- Askeland, D., & Phulé, P. (2006). *Science and Engineering of the Materials*. (5^{ta}. ed.). México: Tomson Brooks.
- Balankin, A. S., & O. Susarrey. (1999). A New Statistical Distribution Function for Self-Affine Crack Roughness Parameters. *Philosophical Magazine Letters*, 79(6).
- Balankin, A. S.; Hernández, L.; Urriolagoitia, G.; Susarrey, O.; Gonzáles, J. M.; Martínez, J. (1999). Probabilistic Mechanics of Self-Affine Cracks. *Proceedings of the Royal Society*, 455 (7).
- Bell, C., & Johnson, D. (2007). *Resistencias de materiales*. (4^{ta}. ed.). México: McGraw-Hill.
- Buckley, C. P. (2005). *Material Failure. Lecture Notes*. Oxford: University of Oxford.
- Budinski, K. (1992). *Engineering Materials Properties and Selection*. (5^{ta}. ed.). Washington: Prentice-Hall.

- Budynas, R., & Nisbett, J. K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. (8ta. ed.). México: McGraw-Hill.
- Erdogan, E. (2000). Fracture Mechanics. *International Journal of Solids and Structures*, 27, 171–183.
- Ferrer Jiménez, C., & Amigo Borrás, V. (2005). *Tecnología de materiales*. México: Alfa y Omega.
- González Vázquez, J. L. (2008). Propagación de grietas por fatiga en soldaduras SAW de Tubo de Acero API 5L en Probetas SEN Curvas no Estándar en la Dirección Corta Radial. (Tesis de maestría), ESISQUIE–IPN, México, D. F.).
- González, J. L. (2004). *Mecánica de la fractura*. México: Limusa.
- Irwin G. (1957). Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. *Journal of Applied Mechanics* 24, 361–364.
- Mangonon, P. L. (2001). *Selección y diseño de ciencia de los materiales*. México: Pearson Educación.
- Martínez Lorenzo, Susarrey Orlando, L. C.; Balankin; Martínez José, A. (2000). Mecánica de la fractura probabilística para análisis de oleoducto. *Revista Científica* (en línea): http://www.mfractal.esimez.ipn.mx/integrantes/balankin/balankin_publications/42_difusion/42_11.pdf.
- Mendenhall, W., & Sincich, T. (1999). *Probability and Statistics for Engineering and Science*. (4ta. ed.). Mexico: Prentice-Hall.
- Orowan, E. (1948). Fracture and strength of solids. *Reports on Progress in Physics XII*, 185–232.
- Palisade Corporation. (2002). *@Risk Risk Analysis and Simulation*. [CD-ROM. 4.5]. New York: Palisade Corporation.

Shigley, J. E., & Mischke, C. (1990). *Diseño en ingeniería mecánica*. (4ta. ed.) México: McGraw-Hill.

Smith, W. F., & Hashemi, J. *Basis of the Science and Engineering of Materials*. (4ta. ed.). México: McGraw-Hill.

Walpole, R., & Myers, R. (1992). *Probabilidad y estadística*. (4ta. Ed.). México: McGraw-Hill.

Reconocimientos

Se le agradece a la empresa FALCONDO por su gran aporte en el trabajo experimental y el apoyo brindado por el Grupo de Mecánica Fractal de la ESIMEZ del Instituto Politécnico Nacional de México D. F.

José Luis Soto Trinidad

Es profesor, pleno investigador en el Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC) en ingeniería mecánica y realiza investigaciones en las líneas de diseño mecánico, mecánica de la fractura, estudio de materiales y fractales conjuntamente con investigadores del Instituto Politécnico Nacional de México. También imparte docencia como profesor de ingeniería en la UASD. Tiene varias publicaciones en revistas indexadas y ha participado como ponente en varios congresos internacionales sobre ingeniería. En junio de 2000, se graduó de Ingeniero Electromecánico Mención Mecánica por la Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD). En marzo de 2004, se graduó de maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica-Diseño Mecánico por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional de México DF. En Julio de 2007, obtiene su doctorado en Ciencias en Ingeniería Mecánica en esta institución.

Email: sototjoseluis@yahoo.es

Recibido: 15/02/2013

Aprobado: 02/05/2013