

CAPITULO III.- MARCO TEÓRICO DEL ANÁLISIS DE INTEGRIDAD DE DUCTOS

III.1.- Cambio en la administración del Mantenimiento

En 1992, a raíz de la división de Petróleos Mexicanos en un Corporativo con cuatro Subsidiarias: Pemex Refinación, Pemex Exploración y Producción, Pemex Petroquímica y Pemex Gas y Petroquímica Básica, además de eventos externos tales como la integración del Tratado de Libre Comercio de América del Norte y la tendencia a la globalización, se acentuó en México la presencia de empresas internacionales (norteamericanas y europeas) especializadas en la operación y mantenimiento de ductos, estas empresas, iniciaron a difundir filosofías y metodologías, si bien de origen distinto, muy afines en sus conceptos y fundamentos, en los que se da un importante giro hacia la administración particular de cada ducto, sobre la base de avanzados estudios, desarrollos y modelos, con lo que ya no se aplica la rehabilitación absoluta sino la tecnológicamente suficiente para llevar a cabo con la mayor eficiencia el cumplimiento de la misión de transporte con la máxima seguridad operativa. Para realizar esto, fué necesario capacitar y actualizar a los técnicos de Petróleos Mexicanos, con la subsecuente involucración y adaptación de estas Filosofías y Metodologías.

Debido a lo anterior, el departamento responsable del mantenimiento a los ductos de la RMSO de PEP inició la búsqueda de mecanismos o metodologías con instituciones dedicadas a la investigación que les permitiera optimizar los recursos presupuestales autorizados y ejercerlos donde eran requeridos, esto sin sacrificar la confiabilidad en la operación de los mismos.

Con esta nueva cultura de mantenimiento se pretende proporcionar el mantenimiento requerido físicamente por los ductos como resultado de inspecciones previas y no el mantenimiento convencional basado en normas conservadoras, con esta metodología, la administración del mantenimiento ha evolucionado de la confrontación de una norma o código, a un sistema dinámico de alto nivel técnico que permite una mayor precisión en las evaluaciones y por tanto mayor eficiencia del mantenimiento.

Tabla 3.1 Mantenimiento convencional del gasoducto de 36"Ø Abkatun-Pol-Atasta

Actividad	Frecuencia
Protección interior	diario
Limpieza Interior	Semestral
Mantenimiento a válvulas superficiales	semestral
Inspección y levantamiento en línea regular	semestral
Monitoreo de protección catódica en línea regular	Semestral
Inspección de Cruces submarinos con otras líneas	Anual
Inspección de arribo playero	Anual
Inspección de Ductos Ascendentes con END	Anual
Protección anticorrosiva con recubrimientos	Triannual
Inspección Interna con Vehículo Inteligente	Pentannual

III.2.- Fundamentos del Análisis de Integridad

El análisis de integridad se fundamenta en conocimientos teóricos y prácticos de mecánica de la fractura la cual es una disciplina que estudia la resistencia de un cuerpo agrietado. Para ello se basa en el conocimiento de tres aspectos:

1. La resistencia del material al crecimiento de grietas, es llamada tenacidad a la fractura y es una propiedad del material.
2. El factor de intensidad de esfuerzos K que determina la magnitud de esfuerzos en la punta de la grieta y que depende del tamaño y forma de la grieta, del tipo de cuerpo, por ejemplo: tubo, viga, etc, y de la forma de aplicación de carga (presión, flexión, etc).
3. El tamaño, forma y localización de la grieta(si es radial, longitudinal, laminación, etc.)

Una de las aplicaciones de mayor impacto de la mecánica de fractura es la predicción de la vida útil de una estructura. Cuando la causa primaria del fin de la vida de una estructura es un proceso de agrietamiento, 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. La predicción de vida bajo esta premisa, es relativamente simple y consiste en que, una vez detectada una grieta y conociendo su rapidez de propagación bajo las condiciones esperadas de servicio, el problema sea calcular el tiempo de propagación de la grieta, desde su tamaño detectado hasta su tamaño crítico, ese tiempo será el *tiempo de vida residual* [REF.7]

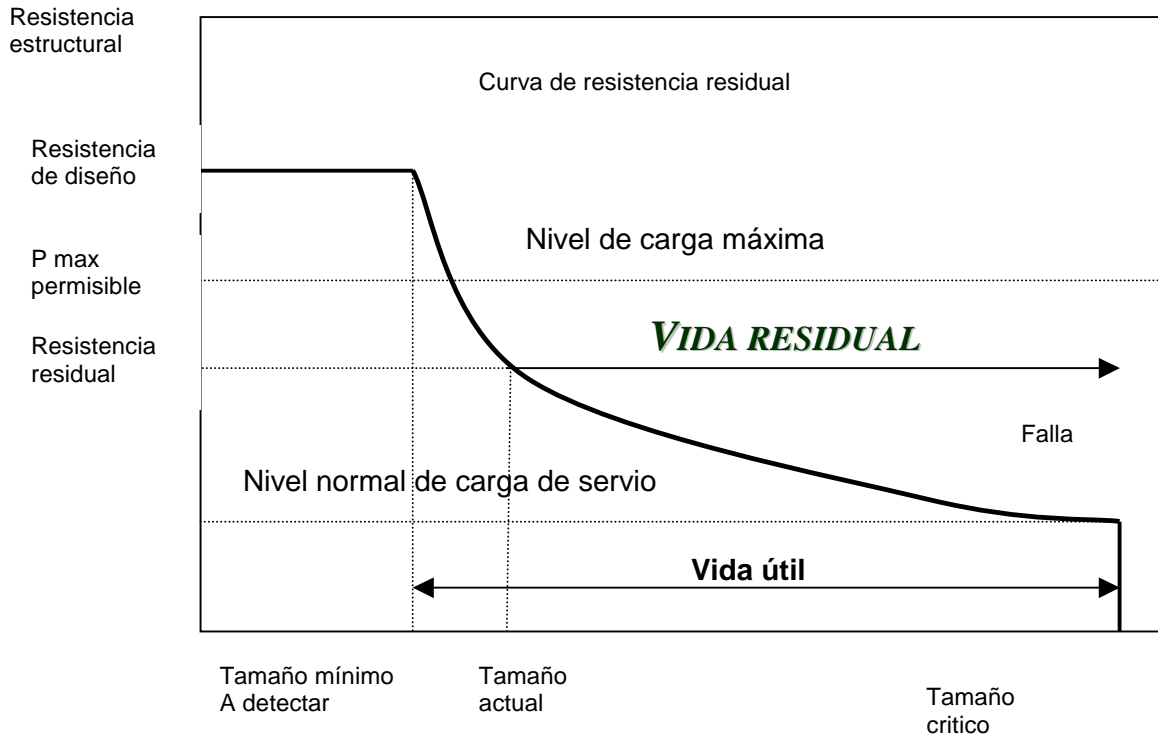


Figura 18. Definición de vida útil desde el punto de vista de la mecánica de fractura.

Un análisis mas detallado de la figura 18. Permite reconocer otros aspectos relevantes de la predicción de vida. Primero, todo componente estructural es diseñado bajo la suposición de que el material no contiene defectos y la resistencia de diseño es la determinada por las propiedades mecánicas de los materiales de fabricación y las características geométricas (espesor, ancho, forma, etcétera) del componente. 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. El tamaño de grieta que comienza a provocar una disminución de la resistencia será por lo tanto, el tamaño mínimo a detectar mediante la inspección no destructiva; en otras palabras, la técnica de inspección no destructiva debe tener la

sensibilidad y resolución suficientes para detectar como mínimo, una grieta cuyo tamaño reduzca la resistencia. Es a partir del tamaño mínimo a detectar y hasta el tamaño crítico, que se obtiene el tiempo de vida útil, o sea la vida máxima garantizada del componente; no se puede garantizar una mayor vida debido a que no se puede asegurar que se detecten grietas más cortas que el tamaño mínimo

La vida residual y la vida útil están determinadas por el punto de falla, que es aquel en que el tamaño de defecto provoca una resistencia residual igual al nivel de carga normal de servicio, haciendo que la fractura sea inminente.

III.2.1.- Deterioro de componentes estructurales

Cuando una estructura se encuentra en servicio, esta sometida a la acción de diferentes fuerzas y acciones agresivas provenientes del servicio y del ambiente al que esta 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.

Las formas de daño mas comunes que acortan la vida útil de un ducto son:

- *Corrosión localizada*
- *Corrosión uniforme*
- *Erosión y desgaste*
- *Agrietamiento inducido por hidrógeno*
- *Agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos*

La susceptibilidad de un material a estas formas de daño depende de la interacción de varios factores entre los que destacan las propiedades mecánicas, la composición química, la microestructura, la composición, pH y temperatura del ambiente, la presión o carga de trabajo, la temperatura y condiciones de servicio y las formas de protección aplicadas, por lo que para la predicción de vida deben de analizarse todos y cada uno de los factores antes mencionados.

A partir de una inspección no destructiva se establecen el tamaño, forma, tipo y distribución de los defectos presentes en la estructura.

III.3.- Principios del Análisis de Integridad

El análisis de integridad consiste en la “Evaluación del estado estructural del ducto, basándose en la identificación del tipo y grado de severidad de los defectos presentes en él, a partir de los reportes de inspección no destructiva y la información técnica del ducto”. [REF.8]

El Análisis de integridad se basa en el cálculo de:

1. La presión o carga máxima permisible de operación del ducto o tramo de ducto en presencia de defectos.
2. El tamaño máximo tolerable de defecto.
3. La rapidez de crecimiento del defecto.

Estos cálculos están fundamentados en los conocimientos de la mecánica de la fractura y se apoyan en el conocimiento de las propiedades mecánicas de los materiales de fabricación y las dimensiones de los defectos presentes, detectados

por inspección no destructiva. Esta información debe ser obtenida de los reportes de inspección y mantenimiento y del historial propio del ducto. Por otra parte, los datos de propiedades mecánicas, caracterización metalúrgica y otros datos, se obtienen mediante pruebas de laboratorio o se utilizan los valores nominales de acuerdo a la especificación del material de construcción. El análisis de fallas será un requisito cuando ésta se presente y sus resultados serán tomados en cuenta para el análisis de integridad.

El principal problema de las líneas submarinas es la ausencia de importantes piezas de información del ducto, ya que una vez construida la línea es muy difícil verificar algún dato in-situ; por lo que necesariamente se debe emplear el criterio, para seleccionar los valores de entrada del análisis. En todo caso el criterio debe ser conservador, es decir, debe considerar el peor de los casos, esto es: el mayor esfuerzo, el ambiente más agresivo y las menores propiedades del material, por lo que el análisis puede resultar en una sobre estimación de la severidad del defecto analizado. Por otro lado, ninguna sobre estimación deberá ser considerada como una garantía de una resistencia y vida remanente mayores, y el usuario deberá realizar las acciones pertinentes de reparación, adecuación de condiciones de operación o retiro dentro de la forma y tiempo establecidos en las recomendaciones del Analisis de integridad.

El análisis de integridad es aplicable a ductos marinos y ductos ascendentes desde la trampa de envío de diablos en la plataforma de producción y hasta la trampa de recibo en la instalación donde son procesados y sus alcances son los siguientes:

- *Solo aplica a líneas fabricadas con tubería de acero al carbono y unidos por soldadura.*
- *Establece los criterios para la evaluación de severidad de defectos que estén presentes en el ducto, según su tipo y tamaño, así como los requerimientos de inspección no destructiva.*
- *Específica los datos e información que son necesarios para calcular la resistencia residual y la vida residual de los tramos del ducto analizado.*
- *Establece los criterios de aceptación, reparación o retiro de los tramos del ducto con defectos para garantizar la seguridad durante su operación.*

Para realizar un análisis de integridad, es necesario contar con la información mínima necesaria que en forma resumida contiene lo siguiente:

- *Datos de diseño y construcción*
- *Datos de operación*
- *Reporte de las condiciones actuales de servicio y máximas posibles.*
- *Reporte del historial*

El criterio de análisis de integridad descrito está basado solo en la habilidad del ducto para mantener su integridad mecánica bajo presión interna, combinada con presión hidrostática y cargas externamente impuestas por oleaje, movimientos de suelos y corrientes marinas. Entendiéndose la integridad mecánica como la capacidad del ducto para contener un fluido a presión en su interior, soportar las cargas externamente impuestas y mantener su forma y continuidad sin presentar fugas, agrietamientos o rupturas.

La exactitud de los resultados del análisis es función únicamente de la exactitud de los datos proporcionados y de la veracidad del reporte de la inspección no destructiva. Los cálculos serán válidos siempre y cuando las condiciones de operación permanezcan dentro de los límites de variación indicados en este procedimiento y que no haya cambios de servicio, cambio de materiales, o modificación de las cargas o presiones externas, aún cuando éstas no se hubieran realizado en aquellas secciones, áreas o tramos del ducto donde se ubica el defecto.

En ausencia parcial de información del ducto, el analista necesariamente empleará su criterio para seleccionar los valores de entrada del análisis. En todo caso el criterio será conservador, es decir, se considerará, según el caso: el mayor esfuerzo, el ambiente más agresivo y las menores propiedades del material tal como fue mencionado en la hoja anterior. [REF.9]

III.4.- Criterios del Análisis de Integridad

La base del diseño y evaluación de ductos y en general de cualquier componente estructural o mecánico es el esfuerzo. Si el esfuerzo es aceptable, es decir, se encuentra por debajo del valor máximo permisible, el ducto o componente es aceptable y puede seguir operando. Asimismo, la predicción de vida se realiza determinando la rapidez de crecimiento de defecto y calculando el tiempo en el cual el defecto producirá un esfuerzo superior al permisible o una fuga, por lo tanto el trabajo analítico del Análisis de Integridad se fundamenta, en primera instancia en la determinación del esfuerzo operante en el ducto o tramo de ducto en el momento del análisis.

Los ductos marinos y risers están sujetos a condiciones de carga que producen los siguientes esfuerzos:

- *Esfuerzo circunferencial por presión interna: SC*
- *Esfuerzo longitudinal (por presión interna, flexión y expansión): SL*
- *Esfuerzo fluctuante por: mareas, vibraciones por efecto de vórtice, movimiento de plataformas, presiones cíclicas y fluctuaciones de presión.*
- *Esfuerzo de colapso por presión externa*

La presión de diseño (P_d) es la presión máxima a la que se puede operar el ducto según su diseño original, suponiendo que no contiene defecto alguno. Generalmente esta definida en términos de la presión que produciría un esfuerzo circunferencial en la pared del tubo, igual a una fracción del esfuerzo de cedencia del material de fabricación de la tubería. La fracción es el factor de seguridad que depende principalmente del tipo de servicio. P_d se calcula como:

$$P_d = \frac{2(S_o)t_n}{D} F_1 + P_e$$

Donde S_o es el esfuerzo de cedencia, t_n es el espesor nominal, D es el diámetro, P_e es la presión externa por la columna hidrostática y F_1 es el factor de seguridad (usualmente 0.5 para raiser y 0.72 para la línea regular). [REF.10]

La presión de falla (P_f) es la presión interna del ducto que produce una fuga o ruptura de la tubería en el tramo que contiene el defecto analizado. La presión hidrostática no deberá restarse al valor de P_f , porque ya ha sido considerada en el cálculo de P_f . En el Análisis de integridad, los cálculos de esfuerzo deben expresarse finalmente como una presión máxima permisible de operación (PMPO); esta es la presión máxima a la cual se puede operar un ducto que contiene defectos, preservando su integridad estructural y su factor de seguridad por diseño. Cuando la PMPO sea igual o mayor que la diseño, se tomará a ésta última como la PMPO. La PMPO se determina como:

$$PMPO = P_f \times F_1$$

Debido a que en líneas submarinas y raisers frecuentemente el esfuerzo longitudinal proviene de fuentes ajenas a la presión interna, el límite de integridad puede ser expresado con base en este esfuerzo. De este modo, se define el esfuerzo longitudinal máximo permisible (SLMP), dado por $SLMP = S_o F_2$. Donde S_o es el esfuerzo de cedencia mínimo especificado y F_2 es el factor de seguridad para esfuerzo longitudinal.

Muchas veces es necesario analizar varios estados de esfuerzos a la vez para comprender mejor un problema, para esto se usan los mapas de cedencia. Estos son una representación gráfica de los criterios de cedencia, se dan en función de coordenadas dadas por los esfuerzos principales y definen las “regiones” de deformación elástica y plástica.

Los mapas de cedencia mas usados son los correspondientes al esfuerzo plano, en el cual solo hay componentes en dos dimensiones. Esta condición se cumple, entre otros en:

- Superficies libres.
- Combinaciones tensión-torsión.
- Recipientes a presión (como líneas de transporte de hidrocarburos).
- Placas delgadas.

En esfuerzo plano siempre hay un esfuerzo principal que vale cero; por conveniencia de notación llamaremos a este σ_3 , aunque sabemos que el 3 puede corresponder a un esfuerzo negativo, σ_1 y σ_2 serán los esfuerzos principales diferentes de cero, independientemente de su valor.

Aplicando el criterio de Von Mises:

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_2^2 + \sigma_1^2} \leq \sigma_0$$

Elevando al cuadrado:

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2 \leq \sigma_0^2$$

Esta ecuación es equivalente a :

$$x^2 + y^2 - xy \leq c^2$$

que es la ecuación de una elipse, que al graficar presenta la forma descrita en la figura 19.

Así, toda combinación de esfuerzo que este dentro de la elipse no produce cedencia y los puntos que estén fuera significan deformación plástica. El contorno de la elipse es el limite elástico.

Al observar la elipse de la figura 19, se observa que en los cuadrantes I y III (donde existen esfuerzos del mismo signo (+)(+) y (-)(-)) hay una área de aceptación mayor que en los cuadrantes II y IV, lo anterior obedece a que si existe tensión-tensión o compresión-compresión se promueve menor deformación plástica, así como un esfuerzo cortante mínimo.

El esfuerzo longitudinal (SL) tiene un efecto muy importante en la condición de falla del tubo. En general si el SL es de tensión el riesgo de deformación plástica y de colapso disminuyen, mientras que un SL compresivo, facilita la cedencia y el colapso de la tubería. Esto se muestra esquemáticamente en la figura 19.

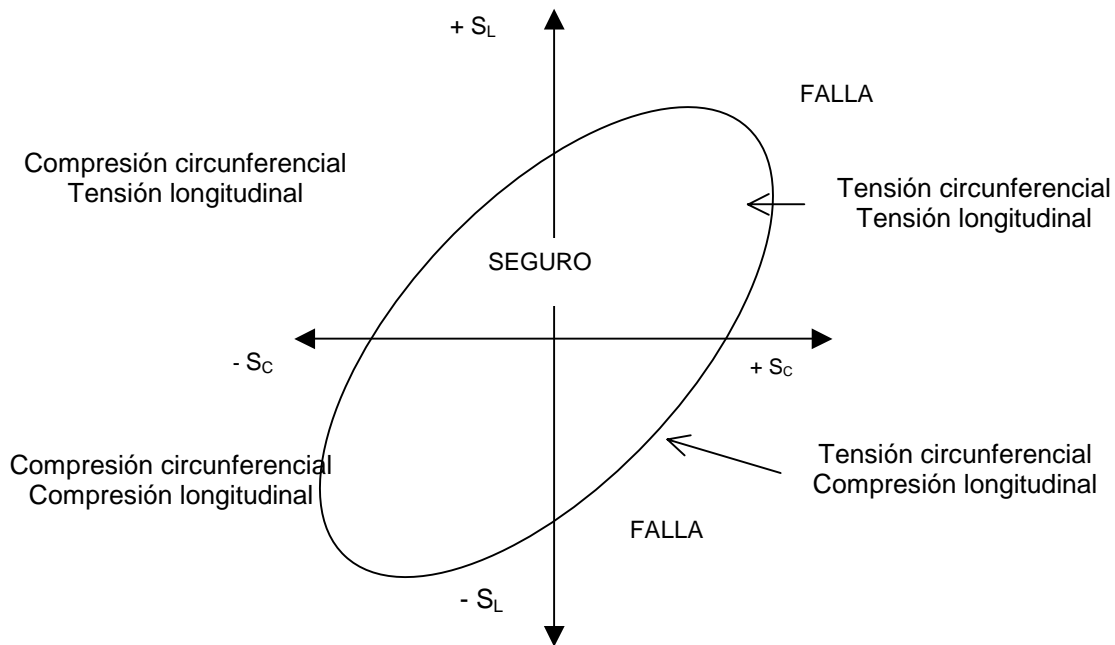


Figura 19. Efecto del esfuerzo longitudinal en la falla de un ducto según el criterio de Von Mises. Las combinaciones de esfuerzos que caen dentro de la elipse son seguras y las que caen fuera provocan falla por plasticidad o colapso. Nótese que el segundo y cuarto cuadrantes requieren menores esfuerzos para la falla. Las condiciones de los cuadrantes 2 y 3 no ocurren en líneas en servicio

Una manera conveniente de evaluar defectos en líneas submarinas es considerar el esfuerzo equivalente o de Von Mises. Para líneas submarinas y risers, el esfuerzo equivalente de Von Mises, no deberá exceder el valor del esfuerzo de cedencia mínimo especificado del material (S_o) multiplicado por un factor de seguridad $F3$.

Otra consideración importante es que el esfuerzo cortante se puede determinar mediante un análisis de flexibilidad, en ausencia de este tipo de análisis se puede aproximar de manera conservadora como $SL = 0.5Sc$

En situaciones donde la forma principal de daño sea la fatiga, la integridad del ducto se evalúa en función del número de ciclos de falla (N). La metodología mas común de evaluación de fatiga en líneas submarinas se basa en la curva de vida en fatiga o curva S-N. Normalmente las curvas S-N son determinadas en pruebas de laboratorio en probetas extraídas de tubos de la misma especificación que los instalados y probadas en el mismo ambiente.

La presencia de grietas debido a daño físico, fatiga, agrietamiento por corrosión-esfuerzos, hidrógeno absorbido y defectos en soldaduras, es posible en líneas submarinas y risers, por lo que el uso de la mecánica de fractura es obligatorio. Una amplia variedad de metodologías para evaluación de grietas han sido desarrolladas a partir de la mecánica de fractura, pero sin duda la mas ampliamente aceptada es la basada en los Diagramas de Análisis de Fallas (DAF).

Si el punto de evaluación cae dentro de la curva límite del DAF, la grieta es estable y no hay riesgo de falla y si el punto cae sobre la curva límite o fuera de ella, el riesgo de falla es inminente. Cabe aclarar que en mecánica de fractura se entiende por falla a la condición de propagación catastrófica de grieta y por lo tanto una fuga producida por una grieta pasante pero que no se propaga no es considerada en esta metodología. [REF.7]

III.5.- Procedimiento General del Análisis de Integridad

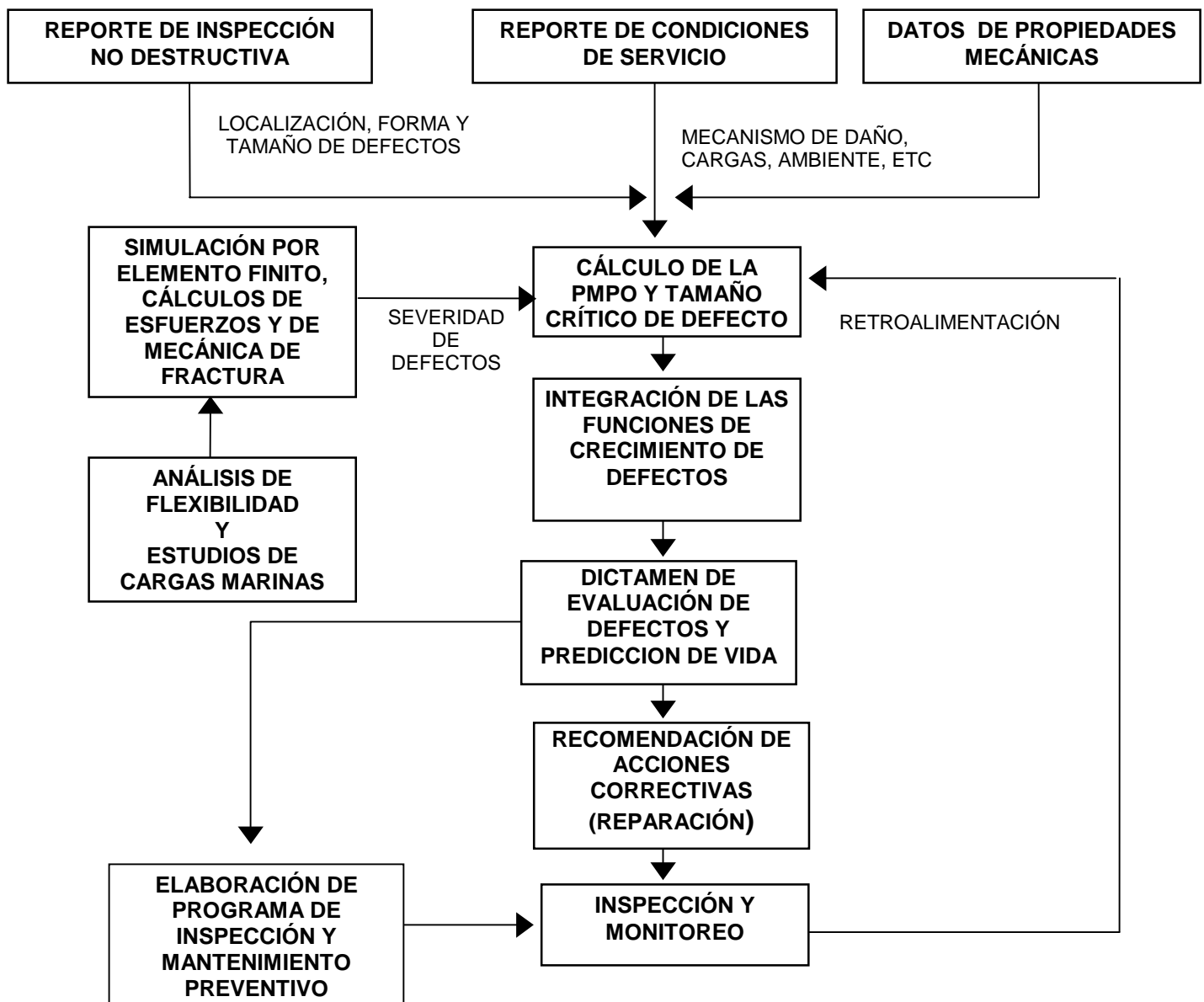
De acuerdo a las consideraciones anteriores, el Análisis de Integridad de un ducto marino o riser que haya sido inspeccionado no destructivamente mediante vehículo inteligente de inspección interna se puede realizar de acuerdo al siguiente procedimiento general. [REF.1, 3]

- I. **Reporte de inspección no destructiva y de la información técnica del ducto.-** El reporte de la inspección no destructiva deberá contener la lista de defectos, la clave de identificación del defecto, su ubicación, tipo de defecto y dimensiones y un reporte gráfico de la forma, tamaño y localización de defectos en la tubería.
- II. **Análisis preliminar.-** Se realizará un análisis preliminar de integridad, basado únicamente en la información recibida. Con estos datos se identificarán las formas de daño presentes y se relacionarán con las condiciones de servicio, ambientales, etc. Con esta información se determina la PMPO y se realiza una primera estimación de la vida remanente (VR), empleando los criterios descritos en la sección anterior y se presentan las recomendaciones de inspección complementaria y de reparación de aquellos defectos seleccionados para tal efecto. El análisis preliminar contiene además los requerimientos de muestreo y pruebas de laboratorio que deberán realizarse en caso de que así se requiera y las recomendaciones provisionales de reparación.
- III. **Inspecciones complementarias.-** Cuando así se determine, se realizarán inspecciones complementarias locales de indicaciones específicas para corroborar si la información proporcionada por el vehículo inteligente es correcta y adecuada.
- IV. **Análisis de resultados.-** Con base en los resultados de la inspección complementaria y pruebas, se realizará el análisis de integridad final, el cual consiste en lo siguiente: a) Análisis determinístico de evaluación de severidad de defectos. b) Determinación de las formas y rapidez de deterioro operantes y cálculos de vida remanente c) Análisis probabilístico.

- V. **Reporte final.**- Este documento contendrá la lista definitiva de reparaciones priorizada, los procedimientos de reparación, la presión o carga máxima permisible de operación, el programa de inspección a futuro y las recomendaciones de operación, inspección y mantenimiento para incrementar el nivel de seguridad de la instalación y extender su vida útil. [REF.5, 8]

El diagrama de flujo de la página siguiente muestra este procedimiento en forma gráfica.

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE INTEGRIDAD DE LÍNEAS SUBMARINAS Y RISERS



Para la realización del análisis de integridad es obligatorio contar con la información referente al ducto objeto de análisis. La calidad del análisis de integridad depende completamente de la calidad de la información, por lo tanto es importante establecer el alcance de cada grupo de información requerida.

III.6.- Criterios de Severidad de Defectos [REF. 8]

Los defectos a considerar para el Análisis de integridad de líneas submarinas y risers son:

- *Reducción de espesor*
- *Grietas*
- *Ampollas y Laminaciones*
- *Abolladuras y Entallas*
- *Desalineamientos en soldaduras circunferenciales.*
- *Inclusiones no metálicas y otros defectos del material.*
- *Defectos en soldaduras como: socavación, quemadura, falta de penetración y porosidades.*
- *Deformación plástica*
- *Flexiones y pandeos*

Los criterios utilizados en ductos terrestres para definir si un defecto debe ser considerado como severo, para dictaminar posteriormente si el tramo que lo contiene debe ser reparado o retirado de servicio tienen ligeras variantes para ductos marinos, estos criterios son:

1. $PMPO \leq Pop$ (donde PMPO es la Presión Máxima Permisible de Operación y Pop es la Presión de Operación).
2. Pérdida de espesor $> 80\%$
3. Todas las grietas mayores que las permitidas por las normas de construcción son severas, serán analizadas por mecánica de fractura. Este criterio no aplica a laminaciones ni ampollas, las cuales serán objeto de un análisis especial.

4. $TVR < \text{Plazo para la próxima inspección}$. (TVR es tiempo de vida remanente).
5. Deformación plástica mayor de 0.5%.
6. Un tramo o totalidad de ducto, deberá considerarse para retiro, si la cantidad o extensión de defectos es tal que el costo de la reparación resulta antieconómico de llevar a cabo. El límite antieconómico es determinado por el usuario.

Los siguientes índices definen cuantitativamente el nivel de riesgo de falla. Este límite deberá ser establecido tomando en cuenta factores tales como:

- 1) Importancia estratégica del ducto
- 2) Análisis de riesgo en caso de falla
- 3) Costo de la reparación
- 4) Prioridad en los programas de mantenimiento, etc.

III.6.1.- Clasificación de anomalías en ductos en función de su severidad

Para una mejor comprensión de la severidad y prioridad de los defectos a continuación se definen los siguientes términos:

Presión de Diseño (P_d): Es la presión máxima permisible en ausencia de defectos y en cumplimiento con todas las especificaciones de diametro, espesor, propiedades del material y condiciones de servicio, incluye un factor de seguridad. Generalmente esta definida en terminos de la presión que produciría un esfuerzo circunferencial en la pared del tubo, igual a una fracción del esfuerzo de cedencia mínimo especificado del material de fabricación de la tubería.

Presión de Operación (P_{op}): Es la presión manométrica a la cual se opera el ducto en condiciones normales y estables. Para efectos de analisis, estas mediciones de presión son tomadas en los orígenes de las líneas ya que se desprecian las pérdidas por fricción, disminución de temperatura o reducción de flujo.

Presión de falla (P_f): Es la presión que causa una condición indeseable o de riesgo del tramo que contiene el o los defectos analizados; es decir la presión que produce deformación plástica, crecimiento de defectos, deterioro acelerado de materiales, fuga, colapso y explosión; esta presión es calculada en base a los principios de mecánica de la fractura y de resistencia de materiales.

Presión Máxima Permisible de Operación (PMPO): Es la presión máxima a la cual se puede operar un ducto que contiene defectos, preservando su integridad y su factor de seguridad por diseño.

Tamaño Crítico de Defecto: Es el tamaño de defecto que produce una condición indeseable y de riesgo.

Tiempo de Vida Remanente (TVR): Es el lapso de tiempo que transcurre desde que un defecto es detectado y analizado en su severidad, hasta que alcanza el tamaño crítico, que es el tamaño que produce una fuga o falla. Si el TVR es mayor que el tiempo esperado de servicio o el periodo de la próxima inspección no hay riesgo de falla, pero si TVR es menor que el tiempo esperado de servicio o el periodo de la próxima inspección integral, el defecto debe repararse. Si la reparación no es posible de realizar de inmediato, el TVR puede emplearse para establecer el plazo de la siguiente inspección. Si el TVR es menor de 6 meses, deberá tomarse una acción correctiva inmediata..

Combinación de defectos: Consideramos como la combinación de dos o más defectos, tales como pérdidas de metal internas o externas con defectos de fabricación, falta de fusión, coronas bajas, socavados, quemaduras por arco eléctrico, porosidad, etc. los cuales pueden interactuar entre ellos.

Agrupación de defectos: Cuando dos defectos están muy cercanos entre sí, pueden ser considerados como uno solo para efectos del cálculo de la PMPO y TVR, en tal caso, sus dimensiones pueden agruparse y reportarse como un solo defecto.

Riesgo de falla: Se define como la condición de la tubería que implica un evento no deseado tal como una fuga, una fractura o una explosión: dicha condición, provoca

que la capacidad de la tubería para contener hermeticamente el fluido que transporta y la presión interna a la cual esta sometida sea reducida o eliminada.

El riesgo de falla se determina en función de la presión máxima permisible de operación (**PMPO**) ó del tiempo de vida remanente (**TVR**) de la tubería.

Relación de Presiones (RP) indica a que porcentaje de la **PMPO** esta operando el ducto y por lo tanto es indicativa del margen de seguridad existente. Se define como:

$$RP = PMPO / P_{op}$$

Esta relación indica a que porcentaje de la **PMPO** se opera el ducto.

En base a lo anterior tenemos tres situaciones:

1. Si **RP** es mayor o igual que 1.0, no se afecta el factor de seguridad y el ducto puede ser operado a la **P_{op}**.
2. Si **RP** es menor de 1.0 pero mayor que **FS** (Factor de Seguridad), la operación tiene cierto riesgo pues ya esta haciendo uso del factor de seguridad establecido por la norma y se debe tomar una acción correctiva en un plazo menor a los 12 meses; no obstante, mientras se ejecuta la acción correctiva la **P_{op}** no debe incrementarse por arriba de la **PMPO** reportada en el analisis de integridad.
3. Si **RP** es menor o igual que **FS**, se debe tomar una acción correctiva inmediata que puede ser:
 - *Reducción de la presión de operación por debajo de la PMPO,*
 - *Colocación de un refuerzo o ejecución de acción correctiva recomendada inmediata y*
 - *Suspensión del servicio.*

Relación de esfuerzos (RS) Es la relación entre el esfuerzo de cedencia minimo especificado (**S_o**) y el esfuerzo equivalente de Von Mises (**S_{vm}**) en el tramo analizado. La relación se calcula de la forma siguiente:

$$RS = S_{vm} / S_o$$

Si la relación de esfuerzos es igual o mayor que 0.9, el tramo analizado tiene esfuerzos mayores a los permisibles y debe tomarse una acción correctiva.

Prioridades de acción correctiva

La prioridad de acción correctiva es un factor que define la urgencia con la que se debe tomar una acción correctiva en un tramo de ducto que se ha dictaminado para reparación, de acuerdo a los criterios de severidad. Debido a que un ducto puede fallar por aumento de presión, conclusión de su vida remanente por esfuerzos excesivos, se define un factor de priorización para cada una de estas formas de falla. La prioridad se establece de la forma siguiente:

Prioridad 1

Muy severa, riesgo inminente de falla en tiempo de varios días o con aumentos leves de presión de operación (10 a 20% arriba de Pop.).

Para que la anomalía se clasifique como prioridad 1 debe cumplirse:

$$RP \leq 1.2FS \quad \text{ó} \quad TVR < 6\text{meses} \quad \text{ó} \quad RS \geq 0.9$$

Prioridad 2

Anomalía severa con alta probabilidad de falla con aumentos de presión moderados o en plazo de meses.

Para que la anomalía se clasifique como prioridad 2 debe cumplirse:

$$1.2FS \leq RP \leq 0.55FS + 0.5 \quad \text{ó} \quad 6\text{meses} < TVR \leq 1\text{Año} \quad \text{ó} \quad 1 < RS \leq 1.2$$

Prioridad 3

Anomalía con severidad moderada, riesgo de falla sustancial, posibilidad de falla si la P_{op} se aproxima a la P_d , ó en represionamientos grandes ó en presencia de altos esfuerzos secundarios en eventos tales como: golpes de ariete, sismos, deslizamientos de terreno, golpes de maquinaria, etc.

Para que la anomalía se clasifique como prioridad 3 debe cumplirse:

$$0.55FS + 0.5 < RP \leq 1.1 \quad \text{ó} \quad 1\text{año} < TVR \leq 5\text{Años} \quad \text{ó} \quad 1.2 < RS \leq 1.5$$

Prioridad 4

Anomalía con severidad leve, riesgo posible si no se realiza la reparación recomendada; la reparación se efectúa con la intención de restablecer la resistencia de diseño y la vida útil del ducto.

Para que la anomalía este clasificada como tipo 4 debe cumplirse lo siguiente:

$$RP > 1.1 \text{ Y } PMPO < PD \quad \text{ó} \quad 5 \text{ años} < TVR \leq 10 \text{ Años} \quad \text{ó} \quad RS > 1.5 \quad \text{y} \quad 0.9SMP_{VM} < S_{VM}$$

Prioridad 5

Anomalía no severa, riesgo dentro de lo permisible por el factor de seguridad.

El criterio a seguir para definir si una anomalía es prioridad 5 es que las condiciones de RP, TVR y RS deben ser superiores a lo establecido para la prioridad 4.

III.7.- Métodos de Análisis de Integridad [REF. 5]

Para efectuar el analisis de integridad a ductos existen 2 metodologías, el método Probabilístico y determinístico, este ultimo puede ser tipo muestral o basandose en los resultados de inspección con equipo instrumentado. El análisis probabilístico y tipo muestral no se considera dentro del alcance de este proyecto sin embargo para efectos de información se describiran brevemente.

III.7.1.- Análisis Determinístico

El análisis determinístico parte de los resultados de inspección no destructiva ya sea con equipo instrumentado de inspección interna o de tipo muestral, el análisis de integridad consiste en: Evaluación de la severidad de los defectos presentes, cálculo de la presión máxima permisible de operación, predicción de vida útil y emitir recomendaciones de reparación.

III.7.1.1 Análisis de Integridad de Líneas Inspeccionables con Equipo Instrumentado

Este método es el que se viene aplicando en el análisis de los ductos de la Región Marina Suroeste que son susceptibles de inspeccionar con vehiculo inteligente de inspección interna (Diablos instrumentados); como su nombre lo indica la integridad

del ducto es determinada a base de cálculos que requieren de información veraz y 100% confiable; la información referente a la operación de los ductos es obtenida directamente del area operativa y las condiciones físicas de los ductos son extraídas de los reportes finales de inspección los cuales son:

- *Reporte de Inspección Interna con vehiculo inteligente (Diablo Instrumentado).*
- *Reporte de Inspección con PND (Pruebas No Destructivas) en ductos ascendentes, interconexiones y cruces de líneas submarinas.*
- *Levantamiento batimétrico de la línea regular con geoposicionamiento.*

Posteriormente se sigue con el procedimiento descrito anteriormente en el punto III.3 aplicando los principios y criterios de análisis de integridad. Para el caso de estudio que presentamos en siguiente capitulo, el gasoducto de 36" Ø Abkatún / Pol-Atasta, fue inspeccionado con Equipo inteligente de inspección interna.

III.7.1.2.- Análisis de Integridad de líneas No Inspeccionables con Equipo Instrumentado (Muestral)

Para conocer el estado de un ducto, que por razones que sean, no se puede inspeccionar con Equipo instrumentado se propone realizar una inspección de carácter muestral, es decir, seleccionado un número de tramos del ducto que conformen una muestra representativa del estado general de la tubería y que permitan, sin necesidad de inspeccionar al 100% la totalidad de la tubería, inferir su estado de integridad estructural con un nivel de confianza de al menos el 96%. Con una inspección de tipo muestral, se puede tener una evaluación confiable de un ducto si consideramos los siguientes aspectos.

Debe ser posible la inspección por el lado externo de la tubería, mediante técnicas y procedimientos que garanticen la detección de cualquier defecto interno o externo contenido en la pared del tubo.

La inspección muestral busca la predicción del estado de una tubería con base en el estado de una muestra de tamaño limitado, que es estadísticamente confiable..

Si bien es cierto que en la inspección muestral no se revisa el 100% del ducto, sus procedimientos proporcionan la suficiente información para determinar la posibilidad

de que existan daños severos no detectados en el tubo, así como para establecer las condiciones de operación que garanticen con el nivel de confianza aplicado al análisis, la operación segura del ducto.

Este tipo de análisis parte de los resultados de Inspección no destructiva, mediante las técnicas visual, líquidos penetrantes y por ultrasonido, que incluye inspección del cuerpo del tubo, costura longitudinal y uniones soldadas, para posteriormente realizar el análisis de integridad de los tramos inspeccionados evaluando la severidad de defectos encontrados y recomendar técnicas de reparación si es necesario basandose:

- Cálculo de la Presión Máxima Permisible de Operación, con base en su estado actual, durante el avance de los trabajos de reparación y una vez concluido el programa de reparaciones establecido.
- Predicción de vida remanente.

Metodología General

Revisión de los planos de construcción, reportes de inspección no destructiva del tramo referido, para establecer el posible estado físico y las formas de daño que potencialmente afectan la tubería.

Inspección física de la totalidad del recorrido del ducto en el tramo referido, para indentificar y medir las características físicas del ducto, sus soportes, su trazo y perfil actual, las condiciones de terreno y ambiente y en general, todas aquellas relacionadas con los trabajos a realizar.

Planeación de la inspección.- Se determinará la cantidad de tramos a inspeccionar utilizando las tablas del Military Standard 105D, con un código de inspección general tipo I y un Nivel de Calidad Aceptable de 4.0. Los tramos para inspección se seleccionaran de acuerdo a los siguientes criterios:

- Tramos en los que se hayan previsto daños
- Tramos en zonas críticas
- Tramos en los que se hayan observado daños
- Al menos 50% de los tramos deben ser seleccionados al azar, para completar el muestreo

Técnicas de inspección

Las técnicas de ensayo no destructivo que se usaran para la inspección son las siguientes:

- Inspección visual (IV)
- Ultrasonido (UT)
- Líquidos penetrantes (LP)

La inspección deberá incluir un reporte de:

- a) Estado de la superficie del tubo,
- b) Condiciones del terreno,
- c) Localización de costuras,
- d) Otros defectos,
- e) Daño físico,
- f) Deformación,
- g) Curvatura del tramo, etc.

cada reporte debe contener la siguiente información:

- *Distancia absoluta del tubo inspeccionado*
- *Diámetro, espesor medio y longitud del tramo inspeccionado*
- *Esquema del tramo del ducto con la ubicación del defecto*
- *Identificación y dimensiones de indicaciones*
- *Localización de costuras.*

Análisis de Integridad

El análisis de integridad de los tramos inspeccionados se realizará de acuerdo al procedimiento usual para tramos de ductos. Para el análisis de integridad final, también se seguirá el procedimiento usual, con la excepción de que la PMPO y la TVR se determinarán para el peor defecto detectado en la inspección muestral, independientemente de que éste haya sido reparado.

Si la inspección muestral fuera rechazada por haber encontrado un número de tramos con una PMPO o TVR menor que las especificadas para el ducto, habrá dos opciones:

1. Incrementar el muestreo
2. Rechazar la línea y fijar una fecha de retiro y PMPO de acuerdo al peor defecto detectado.

Tablas de muestreo del Military Standard 105D

Tabla 3.2. Selección del código de tamaño de muestra.

Tamaño de lote o grupo			Niveles de inspección general		
			I	II	III
2	a	8	A	A	B
9	a	15	A	B	C
16	a	25	B	C	D
26	a	50	C	D	E
51	a	90	C	E	F
91	a	150	D	F	G
151	a	280	E	G	H
281	a	500	F	H	J
501	a	1200	G	J	K
1201	a	3200	H	K	L
3201	a	10000	J	L	M
10001	a	35000	K	M	N
35001	a	150000	L	N	P
150001	a	500000	M	P	Q
500001	y	más	N	Q	R

Tabla 3.3.- Selección de tamaño de muestra y nivel de calidad aceptable en inspección normal

Código del tamaño muestral	Tamaño de la muestra	Niveles de calidad aceptable (inspección normal)											
		1.0		1.5		2.5		4.0		6.5		10	
		Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re
A	2							↓	↓	0	1		
B	2					↓	↓	0	1				
C	5			↓	↓	0	1						
D	8	↓	↓	0	1					1	2	2	3
E	13	0	1					1	2	2	3	3	4
F	20					1	2	2	3	3	4	5	6
G	32			1	2	2	3	3	4	5	6	7	8
H	50	1	2	2	3	3	4	5	6	7	8	10	11
J	80	2	3	3	4	5	6	7	8	10	11	14	15
K	125	3	4	5	6	7	8	10	11	14	15	21	22
L	200	5	6	7	8	10	11	14	15	21	22	↑	↑
M	315	7	8	10	11	14	15	21	22	↑	↑		
N	500	10	11	14	15	21	22	↑	↑				
P	800	14	15	21	22	↑	↑						
Q	1250	21	22	↑	↑								
R	2000	↑	↑										

↓ Use primero el plan de muestreo debajo de la flecha. Si el tamaño muestral es igual al tamaño del lote o del grupo o si lo excede, efectuaremos la inspección al 100%.

↑ Use en primer término el plan arriba de la flecha.

Ac = Número de aceptación.

Re = Número de rechazo.

III.7.2.- Análisis Probabilístico

La dificultad en el acceso físico a una línea marina provoca que sea casi imposible verificar su estado, de manera que no se tenga una certeza de los datos necesarios para un Análisis de integridad, como son: espesores, propiedades de materiales, dimensiones de defectos, magnitud de corrientes submarinas, etc. Estas incertidumbres pueden ser manejadas mediante un análisis probabilístico que permita tomar decisiones dentro de un nivel de seguridad o confiabilidad adecuado.

El análisis probabilístico sigue la metodología general mostrada en la figura 3. Los modos de falla son identificados de los reporte de inspección o de cálculos teóricos o de simuladores para líneas no inspeccionables. [REF.11]

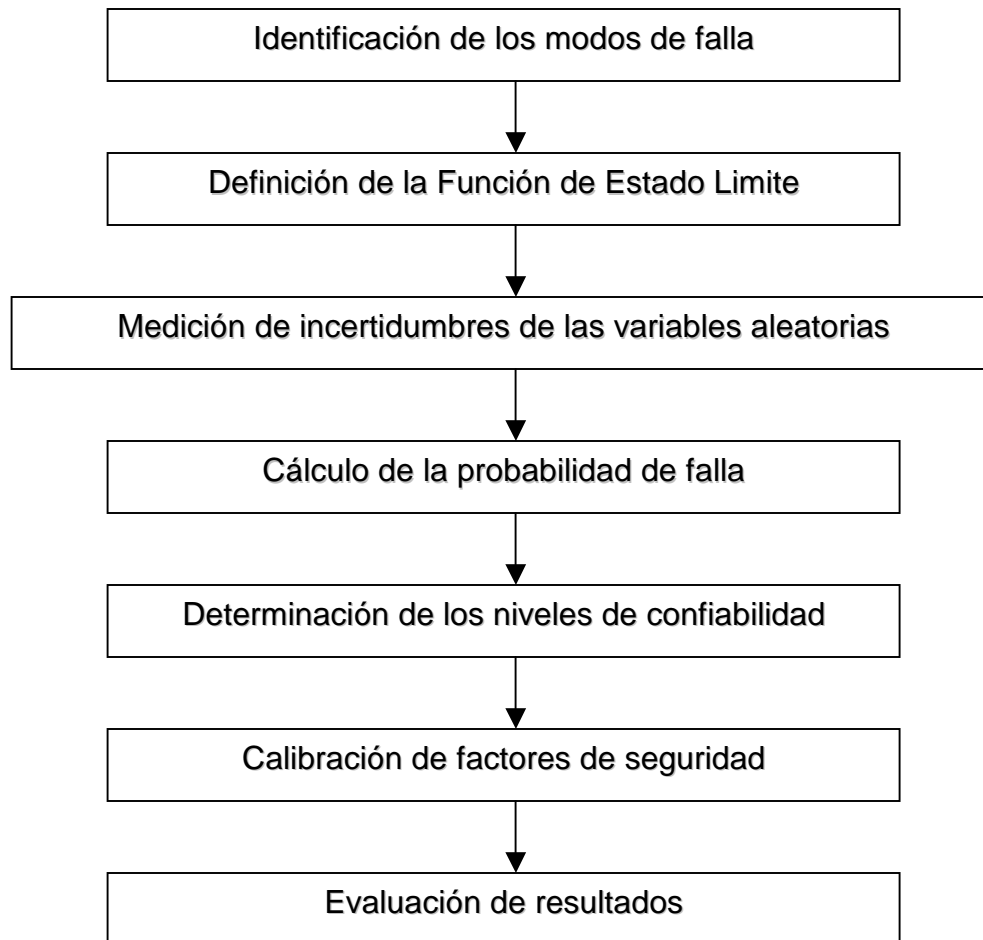


Figura 20.- Procedimiento para el Análisis de Integridad por el Método Probabilística

III.8. Análisis de Flexibilidad

El análisis de flexibilidad es un método que consiste en la determinación del estado de esfuerzos y deformaciones en un ducto bajo la acción de una o mas cargas. Da las bases para el diseño de una nueva línea, ya sea superficial o enterrada, así mismo, permite determinar el estado de esfuerzos en una tubería existente.

Los sistemas de tubería deben tener la suficiente flexibilidad para prevenir la expansión o contracción térmica o movimientos de los soportes los cuales puedan causar:

- *Fallas en la tubería o en los soportes debido a sobreesfuerzo o fatiga.*
- *Fallas en las juntas.*
- *Esfuerzos o deformaciones perjudiciales en tuberías y válvulas o en equipos conectados, resultado de movimiento excesivo y momentos en los tubos.*

Así mismo se puede utilizar para :

- *Evaluación de soportería*
- *Cambios de trazo y perfil en línea regular*
- *Cambios de trazo y perfil en instalaciones*
- *Cambios en condiciones de operación*
- *Evaluación de grado de severidad bajo cargas ocasionales como: vientos, sobrepresiones, desplazamientos inducidos.* Si la expansión no es absorbida por la compresión axial directa del tubo, la flexión debe prevenirse por medio de uso de curvas, loops o contrapesos, así mismo, se debe construir sistemas para absorber las dilataciones térmicas por medio juntas de expansión, juntas deslizables o juntas de bola. Si la junta de expansión es usada, anclas o ataduras con suficiente fuerza y rigidez deben ser instaladas para proveer resistencia a las fuerzas máximas de presión, fluido y las ocasionales utilizadas dentro del análisis.

Para realizar un análisis de flexibilidad se aplica la siguiente metodología:

Inicialmente se determina si se trata de un diseño para una línea nueva o es una línea existente, pudiendo ocurrir en estas últimas cambios en su diseño original por causas externas como deslaves, inundaciones, sismos, etc., o desplazamientos significantes por cambios en las condiciones de operación como incremento de volumen de producción, presión, temperatura, etc.

Posteriormente se clasifica a la línea con base a su localización geográfica, pudiéndose tratar de líneas superficiales, enterradas o tubería sumergida, las cuales tienen características propias influenciadas por el medio externo sobre el que se desarrollan.

El siguiente paso es determinar el tipo de servicio que tiene la línea, esta clasificación se realiza con base en el tipo de producto transportado así como por su localización, dividiéndose principalmente en Oleoductos, Gasoductos así como Tuberías localizadas en plantas de proceso (ASME B31.3).

Las tuberías localizadas en plantas de proceso pueden comprender tanto gasoductos como oleoductos sin distinción, siempre y cuando se encuentren dentro de los límites de la planta, aplicándose factores de seguridad mayores a los comprendidos en línea regular. Línea regular es un sistema de ductos empleados para la conducción de hidrocarburos líquidos o gaseosos de una instalación a otra.

Definido el tipo de servicio se puede establecer las normas y códigos que se van a utilizar, siendo estos principalmente: Norma PEMEX CID-NOR-N-SI-0001/98, Código ASME B31.3, B31.4, B31.8,

Algunos de estos códigos internacionales se utilizan simultáneamente con otros códigos o estándares, o son derivaciones de los mismos como la norma PEMEX CID-NOR-N-SI-0001/98, la cual es la fusión de los códigos B31.3, B31.4 y B31.8 entre otros.

Dentro de los códigos mencionados anteriormente se establecen los requerimientos de diseño, los cuales indican todas las características que debe poseer el sistema de transporte para trabajar de manera segura y eficiente.

Una vez realizado esto se prosigue con la recopilación de toda la información necesaria para hacer las bases de diseño del análisis de flexibilidad, esta información consiste en:

Levantamiento topográfico, mediante el cual se realiza el dimensionamiento del sistema de tuberías, midiendo las elevaciones y cambios de dirección respectivamente. Dentro del levantamiento topográfico se dimensionan además de la tubería el tipo y cantidad de soportes, para considerarlos en el análisis, de igual manera se verifica que estén funcionando correctamente (que este soportando) y el tipo de protección mecánica que hay entre ducto y soporte, la cual generalmente consiste de una resina de poliuretano de alta densidad.

En el caso de tubería superficial se hace un dimensionamiento para cada tramo de tubería y se toma la especificación de todos los elementos que contiene el arreglo, denominando elemento a todos los codos, tees, válvulas, bridas,..., etc, que comprenden el arreglo de tubería.

Otra de las bases de diseño necesarias para el análisis comprende las condiciones de operación, la geometría y características mecánicas del material, el tipo de suelo para el caso de tubería enterrada, así como su localización geográfica.

Con toda la información recopilada se procede al calculo de esfuerzos y deformaciones, estos calculos pueden efectuarse a través de las fórmulas establecidas en la normatividad, sin embargo, solo aplican para problemas sencillos de cargas estáticas ya que su grado de dificultad se incrementa al considerarse mas elementos o cargas dinámicas; los cálculos antes referidos también pueden realizarse a través de softwares especiales que reducen el tiempo de análisis. Uno de los técnicas mas usadas para el análisis de flexibilidad es Método de los Elementos Finitos (MEF), el cual debido al desarrollo comercial de las computadoras es el mayormente utilizado.

Una vez determinado el campo de esfuerzos se comparan con los esfuerzos permisibles establecidos en el código empleado y en caso de rebasar estos límites permisibles se emiten las recomendaciones necesarias para disminuir los esfuerzos o en su caso retirar la pieza.

Generalmente los resultados se muestran a través campos de colores, los campos de colores muestran la distribuciones de esfuerzo en el sistema, a cada color le corresponde un rango, indicando que en esa zona se tienen valores dentro del rango.