

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**ESTUDIO DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE TUBERÍAS
FISURADAS APLICANDO SIMULACIÓN POR ELEMENTOS
FINITOS EN EL MARCO DE LA NORMA API 579**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico,
que presenta el bachiller:

Edward César Herrera García

**ASESOR: Ing. Herbert Yépez Castillo
Dr. Quino Valverde Guzmán**

Lima, Noviembre de 2014

RESUMEN

La susceptibilidad de un componente de presentar fallas en servicio y los numerosos incidentes ocurridos, como por ejemplo en el gasoducto de Camisea, han generado incertidumbre acerca de la integridad estructural de dichos componentes. Ante la necesidad de contar con fundamentos teóricos y criterios técnicos para la evaluación de la integridad de componentes en servicio, han surgido en el mundo normas que posibilitan la toma de decisiones. API 579 es una norma que describe las técnicas de evaluación para equipos a presión utilizados en la industria petroquímica, cuya finalidad es la de diagnosticar la integridad estructural de un componente cuando presenta algún tipo de defecto mientras que está puesto en servicio. Las técnicas de API 579 pueden ser utilizadas para evaluar recipientes a presión diseñados y construidos con códigos ASME BPVC, como también sistemas de tuberías con ASME B31.3, API 650 y 620. Por ello, el presente trabajo de tesis tiene por objetivo evaluar la integridad de una tubería fisurada, basándose en la norma API 579 y simulación numérica por el método de los elementos finitos (MEF). A partir de la norma se implementan procedimientos de evaluación para el caso específico de una tubería fisurada, complementándose dichos procedimientos con simulación computacional enfocada en la determinación de ciertas variables. Los resultados de la evaluación, a partir de los procedimientos implementados y de los modelos computacionales desarrollados, son contrastados con el trabajo del autor H. Sanzi [12], quien es un investigador dedicado al tema de integridad estructural; obteniendo una diferencia de nomas del 9.5%. Finalmente, se realiza un caso aplicativo tratando de evaluar un modelo con las características del primer incidente ocurrido en la línea de transporte de Camisea, de donde se puede observar que solo considerando el efecto de la presión interna en un modelo de tubería fisurada, se produciría la fuga del hidrocarburo antes de la propagación de la fisura y ruptura del componente.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO : ESTUDIO DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE TUBERÍAS FISURADAS APLICANDO SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS EN EL MARCO DE LA NORMA API 579.

ÁREA : Diseño \neq 270

PROPUESTO POR : Ing. Herbert Yépez Castillo, Dr. Quino Valverde Guzmán

ASESOR : Ing. Herbert Yépez Castillo, Dr. Quino Valverde Guzmán

TESISTA : Edward César Herrera García

CÓDIGO : 20072070

FECHA : 10 de Octubre de 2014



DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

La ocurrencia de fallas durante el servicio de diferentes componentes metálicos, advierte la necesidad de tomar conocimiento de criterios para la evaluación estructural de estos componentes mientras están en funcionamiento. En la actualidad, se cuentan con procedimientos que permiten evaluar la integridad estructural, los cuales están basados en la mecánica de la fractura, y permiten la toma de decisiones en aspectos técnicos. API 579 es una de las más reconocidas normas que describe técnicas de evaluación para equipos a presión utilizados en la industria petroquímica, cuya finalidad es el diagnóstico de la integridad estructural de un componente cuando presenta algún tipo de defecto mientras presta servicio. Por ello, el presente trabajo de tesis tiene por objetivo evaluar la integridad de una tubería fisurada implementando procedimientos de evaluación específicos basados en la normativa API 579, complementando dichos procedimientos con el empleo de la simulación numérica por elementos finitos, la cual permitirá la obtención de determinadas variables, como el factor de intensidad de tensiones.

1

Q



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**ESTUDIO DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE TUBERÍAS FISURADAS
APLICANDO SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS EN EL MARCO DE
NORMA API 579.**

Introducción

1. Aspectos teóricos previos
2. Particularidades de la evaluación de la integridad estructural de tuberías fisuradas
3. Simulación y validación de tuberías fisuradas
4. Casos aplicativos

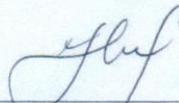
Conclusiones

Bibliografía

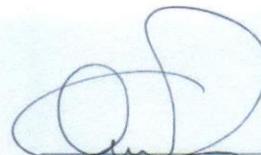
Anexo 1.1 Determinación de la tenacidad del esfuerzo de referencia-Fisura transversal

Anexo 1.2 Determinación de la tenacidad del esfuerzo de referencia-Fisura longitudinal

Máximo: 100 páginas



Ing. Herbert Yépez Castillo
Asesor



Dr. Quino Valverde Guzmán
Asesor





DEDICATORIA

Para mis padres, abuelos y familiares, y en especial a mi hija Vania Sofía, el motor de mi vida.

Gracias por el apoyo y el cariño de quienes me ayudaron a poder lograr alcanzar este gran sueño.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Delia García y Eleuterio Herrera quienes me apoyaron a cumplir este sueño de terminar la universidad.

A mis tíos Hayde García y César Añaños quienes me guiaron, cuidaron y apoyaron desde pequeño para poder lograr este gran objetivo en mi vida.

A mis hermanos Luis Herrera y Elizabeth Herrera quienes han sido un gran soporte y guía en mi vida.

A mi prima Yanina Añaños quien considero mi hermana y una persona especial en mi vida.

A mi hija Vania Sofía quien es el motor y motivo en mi vida y por la quien lucho cada día.

A mis amigos quienes fueron una gran compañía en esta gran experiencia como es la universidad, en especial a mis amigos Daniel Lavayen, Gerardo Calle, David Castillo y Jossymar García.

A mis profesores quienes me apoyaron a lo largo de la carrera y en especial a los profesores Quino Valverde y Herbert Yépez quienes fueron grandes guías y apoyos en la realización del presente trabajo.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	3
1.1. Mecánica de la fractura elástica lineal.....	3
1.1.1. Definición y conceptos básicos de fractura	3
1.1.2. Modos de fractura.....	5
1.1.3. Criterio de Griffith	6
1.1.4. Factor de intensidad de tensiones (K).....	8
1.1.5. Tenacidad a la fractura.....	15
1.2. Procedimientos de evaluación de componentes fisurados.....	16
1.2.1. Clasificación de los procedimientos de evaluación	16
1.2.1.1. Procedimientos selectivos.....	16
1.2.1.2. Procedimientos comprensivos	19
1.2.2. Procedimiento de evaluación de componentes fisurados según API 579....	24
1.2.3. Nivel 1 de evaluación	25
1.2.4. Nivel 2 de evaluación	27
1.2.5. Nivel 3 de evaluación	29
1.3. Simulación computacional.....	29
1.3.1. Introducción.....	29
1.3.2. Simulación numérica	30
1.3.3. Simulación de la fractura mediante elementos finitos	30
CAPÍTULO 2	33
2.1. Generalidades	34
2.2. Procedimiento de evaluación nivel 1	35
2.2.1. Paso 1. Identificación de las condiciones de operación.....	35
2.2.2. Paso 2. Caracterización de la fisura.....	35
2.2.3. Paso 3. Selección de gráficas Cilindro-Soldadura-Fisura	35

2.2.4.	Paso 4. Selección de curvas (A, B y C).....	36
2.2.5.	Paso 5. Determinación de la temperatura de referencia	37
2.2.6.	Paso 6. Determinación de la longitud de fisura máxima permisible	40
2.2.7.	Paso 7. Evaluación.....	40
2.3.	Procedimiento de evaluación nivel 2	41
2.3.1.	Paso 1. Identificación de las condiciones de operación	41
2.3.2.	Paso 2. Caracterización de la carga.....	41
2.3.3.	Paso 3. Determinación de las propiedades del material	41
2.3.4.	Paso 4. Caracterización de la fisura.....	42
2.3.5.	Paso 5. Determinación de esfuerzos	42
2.3.6.	Paso 6. Selección de factores parciales de seguridad <i>PSF</i>	43
2.3.7.	Paso 7. Afectación de esfuerzos, propiedades del material y tamaño de fisura.....	45
2.3.8.	Paso 8. Determinación del esfuerzo de referencia.....	45
2.3.9.	Paso 9. Determinación del factor de intensidad de tensiones.....	47
2.3.10.	Paso 10. Determinación del factor de carga y de tenacidad	50
2.3.11.	Paso 11. Determinación de la gráfica FAD.....	51
2.3.12.	Paso 12. Evaluación.....	52
CAPÍTULO 3.....		53
3.1.	Alcance	54
3.2.	Descripción	54
3.3.	Modelo geométrico.....	55
3.4.	Propiedades del material	56
3.5.	Discretización del modelo	56
3.6.	Condiciones de contorno	58
3.6.1.	Restricciones.....	58
3.6.2.	Aplicación de carga.....	59

CAPÍTULO 4	60
4.1. Evaluación de vainas combustibles	61
4.1.1. Descripción del caso	61
4.1.2. Procedimiento de evaluación nivel 1	62
4.1.2.1. Paso 1. Identificación de las condiciones de operación	62
4.1.2.2. Paso 2. Caracterización de la fisura	62
4.1.2.3. Paso 3. Selección de gráficas Cilindro-Soldadura-Fisura	62
4.1.2.4. Paso 4. Selección de curvas (A, B y C)	63
4.1.2.5. Paso 5. Determinación de la temperatura de referencia	63
4.1.2.6. Paso 6. Determinación de la longitud de fisura máxima permisible	64
4.1.2.7. Paso 7. Evaluación	65
4.1.3. Procedimiento de evaluación nivel 2	66
4.1.3.1. Paso 1. Identificación de las condiciones de operación	66
4.1.3.2. Paso 2. Caracterización de la carga	66
4.1.3.3. Paso 3. Determinación de las propiedades del material	66
4.1.3.4. Paso 4. Caracterización de la fisura	66
4.1.3.5. Paso 5. Determinación de esfuerzos	66
4.1.3.6. Paso 6. Selección de factores parciales de seguridad PSF	71
4.1.3.7. Paso 7. Afectación de esfuerzos, propiedades del material y tamaño de fisura	72
4.1.3.8. Paso 8. Determinación del esfuerzo de referencia	72
4.1.3.9. Paso 9. Determinación del factor de intensidad de tensiones	75
4.1.3.10. Paso 10. Determinación del factor de carga y de tenacidad	77
4.1.3.1. Paso 11. Determinación de la gráfica FAD	78
4.1.3.2. Paso 12. Evaluación	79
4.2. Evaluación ducto API 5L grado X70	80
4.2.1. Descripción del Caso	80
4.2.2. Modelo Geométrico	83

4.2.3.	Propiedades del materia.....	83
4.2.4.	Discretización del modelo.....	83
4.2.5.	Condiciones de contorno.....	84
4.2.5.1.	Restricciones.....	84
4.2.5.2.	Aplicación de carga.....	84
4.2.6.	Simulación.....	85
4.2.7.	Resultados.....	85
4.2.7.1.	Esfuerzos de membrana.....	85
4.2.7.2.	Esfuerzos de flexión.....	85
4.2.7.3.	Esfuerzos de referencia.....	86
4.2.7.4.	Factor de intensidad de tensiones (K_I).....	87
4.2.8.	Evaluación.....	88
	CONCLUSIONES.....	92
	BIBLIOGRAFÍA.....	94
	ANEXO 1.....	1
	A1.1 Determinación de la tendencia del esfuerzo de referencia – Fisura transversal	1
	A1.2 Determinación de la tendencia del esfuerzo de referencia – Fisura longitudinal	7

SIMBOLOGÍA

1. U : Energía elástica
2. E : Módulo de elasticidad
3. γ : Energía de superficie
4. a : Semi longitud de fisura
5. c : Profundidad de la fisura
6. K : Factor de intensidad de tensiones
7. σ_{xx} : Esfuerzo a lo largo de la coordenada x
8. σ_{yy} : Esfuerzo a lo largo de la coordenada y
9. τ_{xy} : Esfuerzo cortante en el plano xy
10. u : Deformación a lo largo del eje x
11. v : Deformación a lo largo del eje y
12. w : Deformación a lo largo del eje z
13. K_I : Factor de intensidad de tensiones en modo I
14. K_{IC} : Tenacidad a la fractura del material en modo I
15. T_{app} : módulo de desgarro aplicado
16. TR : módulo de desgarro del material
17. J : Integral J
18. K_r : Coeficiente de tenacidad
19. L_r : Coeficiente de carga
20. σ_{ref} : Esfuerzo de referencia
21. σ_{ys} : Esfuerzo límite elástico del material
22. T_{ref} : Temperatura de referencia
23. T : Temperatura
24. $2c_{max}$: Longitud máxima permisible
25. σ_m : Esfuerzo de membrana
26. σ_b : Esfuerzo de flexión
27. P_f : Probabilidad de Falla
28. β : Índice de seguridad
29. K_I^P : Factor de intensidad de tensiones debido a las cargas primarias
30. K_I^{SR} : Factor de intensidad de tensiones debido a las cargas secundarias y residuales.
31. \emptyset : Factor por corrección por plasticidad

INTRODUCCIÓN

El transporte de hidrocarburos por medio de tuberías ha sido y es una práctica muy usada e importante en la industria, debido a su gran impacto en la economía actual. Dicha importancia ha generado su estudio durante mucho tiempo realizándose libros, tesis de grado y postgrado dedicados al estudio de las tuberías transportadoras de hidrocarburos o también llamados gasoductos. La realización de estudios y la importancia que genera el uso de los mismos han llevado a instituciones internacionales, como lo son ASME (American Society of Mechanical Engineers), API (American Petroleum Institute), a normalizar las tuberías, no solo desde el punto de vista geométrico sino también desde la metodología de cálculo para el diseño de la red, la instalación, inspección, pruebas y otros aspectos de la seguridad de la operación y mantenimiento de sistemas de transmisión de hidrocarburos.

Este transporte de combustible no está exento de sufrir complicaciones, ya sea por causa de una mala operación, por la degradación o desgaste de las tuberías durante el transcurso del tiempo, defectos de fabricación, etc., en ocasiones generando consigo impactos negativos. Por ello cada vez toma mayor relevancia la prevención ante algún defecto que pueda causar fallas y como consecuencia problemas ambientales, económicos o sociales; ejemplos que ilustran tal situación son los casos expuestos en el informe elaborado por E-Tech International [1], el cual permite apreciar las consecuencias que se generan ante la ocurrencia de fallas en el gasoducto de Camisea. Esta necesidad de prevención hace importante la evaluación de los defectos presentes en los gasoductos con la finalidad de obtener el estado de la tubería y poder tomar decisiones económicas y principalmente de seguridad.

Uno de estos defectos es la fisura, la cual al estar en conjunto con ciertas condiciones de operación podría generar la falla de la tubería y la posterior fuga del combustible, trayendo como consecuencia impactos a la ecología y a la población; debido a esto es importante la detección y evaluación de las fisuras presentes en la tubería. Generalmente la detección y evaluación se realizan empleando una o más normas, las cuales describen la metodología a seguir para la realización de un adecuado trabajo de inspección y posterior evaluación de la fisura; tal es el caso de la norma API 579 [2], la cual se vale de la mecánica de la fractura, para evaluar la condición o el estado de la fisura bajo ciertas condiciones de operación; el empleo de la normativa implica,

en particular la norma API 579, la utilización de gráficos, tablas y factores que generan en la persona un tedioso trabajo y una inversión de tiempo considerable.

El presente trabajo tiene por objetivo evaluar la integridad de una tubería fisurada implementando procedimientos de evaluación específicos basados en la normativa API 579, complementando dichos procedimientos con el empleo de la simulación numérica por elementos finitos, la cual permitirá la obtención de determinadas variables, como el factor de intensidad de tensiones.

Para el cumplimiento del objetivo principal o general se han trazado objetivos específicos que ayuden a su cumplimiento total, los cuales son:

1. Elaborar un resumen del procedimiento general establecido en la norma API579.
2. Establecer los modelos de análisis para determinar los parámetros que pueden obtenerse mediante simulación numérica.
3. Evaluar la integridad estructural de tuberías fisuradas aplicando simulación por elementos finitos en el marco de la norma API 579.
4. Comparar y validar los resultados obtenidos por el análisis de elementos finitos con los resultados obtenidos por los métodos alternativos propuestos en la norma.

Para el cumplimiento de los objetivos señalados se empleará la siguiente metodología.

- Estudio y definición de los procedimientos (pasos) para la evaluación de la integridad estructural de una tubería fisurada en el marco de la norma API 579.
- Identificación de los procedimientos en los cuales se puede implementar el análisis mediante la simulación numérica.
- Definición de la geometría, dimensiones y condiciones de carga y servicio de la tubería en estudio
- Desarrollo de los modelos de análisis para determinar los parámetros que pueden obtenerse mediante simulación numérica.
- Simulación numérica para la obtención de los parámetros que caractericen la mecánica de fractura del componente.
- Análisis y cálculos de métodos alternativos que se indican en la norma.
- Comparación de los resultados obtenidos mediante la simulación por elementos finitos, con los resultados que se obtendrán de métodos alternativos.
- Elaboración del procedimiento para la evaluación de la integridad de una tubería fisurada mediante simulación numérica en el marco de la norma API 579.

CAPÍTULO 1

ASPECTOS TEÓRICOS PREVIOS

La Mecánica de la Fractura es una parte de la ciencia aplicada que tiene como objeto analizar el comportamiento mecánico de elementos estructurales considerando la existencia de fisuras, sea cual sea su origen, en el material del que están constituidos, hasta definir las condiciones críticas que producen su propagación brusca, rápida e inestable, es decir la rotura [3]. Estas condiciones críticas deben ser planteadas en términos adecuados, de forma que se pueda estimar el esfuerzo aplicado o el tamaño máximo del defecto que den seguridad al comportamiento en servicio de diferentes componentes.

Si bien la Mecánica de la Fractura tuvo su inicio en el estudio de los metales, esta ha sido empleada a lo largo del tiempo a numerosos materiales. En atención al comportamiento de los mismos, se puede establecer por una parte a la mecánica de la fractura elástica lineal, aplicable a materiales que no desarrollan plasticidad significativa previamente a la rotura, y por otra, una mecánica de la fractura elastoplástica para materiales de alta ductilidad y comportamiento no lineal, como algunos metales y polímeros.

1.1. Mecánica de la fractura elástica lineal

1.1.1. Definición y conceptos básicos de fractura

La fractura es la separación o fragmentación de un sólido bajo la acción de una carga externa a través de un proceso de creación de nuevas superficies. Usualmente, para fracturar un material se requiere incrementar la carga progresivamente hasta que ocurra un proceso de iniciación de grieta. En ocasiones y dependiendo de las

condiciones de carga, geometría y propiedades mecánicas del material, será necesario incrementar la carga después de que la iniciación de la grieta ha tenido lugar, mientras en otros casos bastará con alcanzar el punto de iniciación de grieta, para luego propagarse espontáneamente. Además una circunstancia muy importante es que la fractura puede propagarse a partir de una grieta preexistente en el material; entonces la etapa de iniciación es suprimida y el proceso se reduce a la propagación de la grieta. [4]

Desde el punto de vista del comportamiento de los materiales, se reconocen dos tipos de fracturas, éstos son:

- **Fractura frágil:** es aquella que se da cuando la deformación de la mayor parte del cuerpo es elástica, de manera que después de la fractura los fragmentos de la pieza pueden juntarse y no presentar grandes cambios respecto a la geometría original.
- **Fractura dúctil:** es la fractura que ocurre después de una apreciable deformación plástica del cuerpo, donde los esfuerzos en una región relativamente grande de la pieza rebasaron el esfuerzo límite elástico.

Estos dos tipos de fractura se pueden apreciar con mayor claridad en la siguiente figura

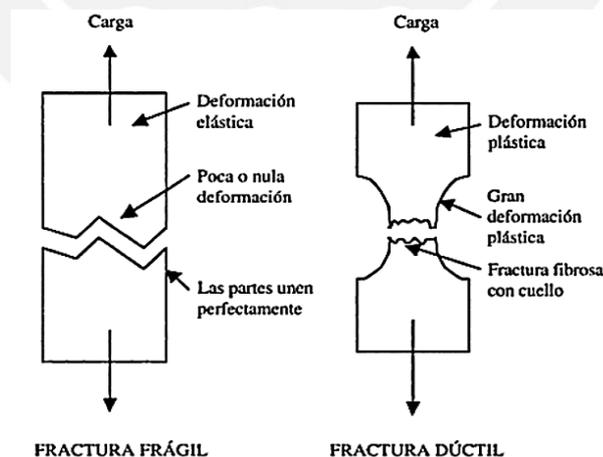


Figura 1. 1 Clasificación de la fractura, desde el punto de vista ingenieril (Mecánica de la fractura, Gonzales Velásquez).

1.1.2. Modos de fractura

Existen tres modos en las que un cuerpo fisurado puede ser sometido a esfuerzos para provocar la separación de las dos superficies de fractura en cada una de las tres direcciones del espacio:

- **Modo I o modo de apertura:** se da cuando el esfuerzo es perpendicular al plano de la fisura.
- **Modo II o modo deslizante:** debido a la presencia de esfuerzos cortantes en el plano de fractura, se produce desplazamientos longitudinales de las superficies en dicho plano.
- **Modo III o modo de rotura transversal:** corresponde al desplazamiento de las superficies de fractura en sentidos opuestos, debido a la aplicación de esfuerzos cortantes en planos diferentes al plano de fractura.

Los tres modos de fractura son mostrados en la siguiente figura.

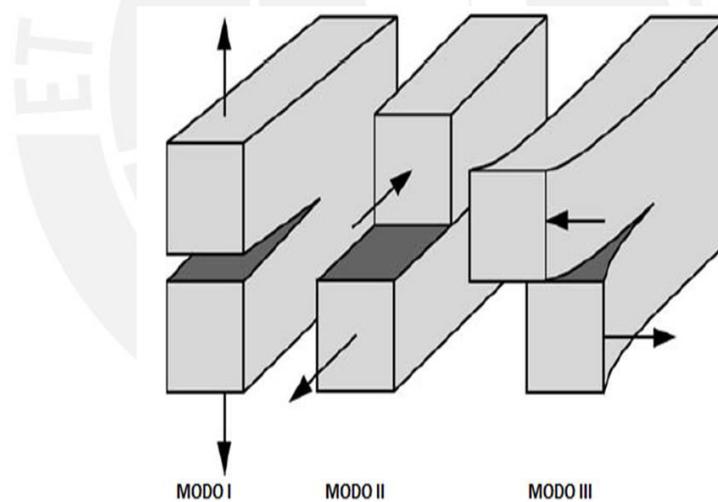


Figura 1. 2 Modos de fractura (*Mecánica de la Fractura: Fundamentos y aplicaciones, T.L. Anderson*)

En la naturaleza no ocurre fenómenos aislados unos de otros, tal es el caso del avance de la fisura, siendo la situación más compleja correspondiente a una combinación de los tres modos de fractura mencionados, sin embargo el modo de fractura predominante es el I.

1.1.3. Criterio de Griffith

De acuerdo con el primer principio de termodinámica, cuando un sistema pasa de un estado de no equilibrio a un estado de equilibrio, se produce una disminución de la energía del sistema. A partir de este principio, Griffith estudió las condiciones de fractura de cuerpos sólidos frágiles con grietas y estableció en el año 1923 la teoría inicial en la que se sustenta la Mecánica de la Fractura [5].

Según lo expresado por Griffith, *“Un cuerpo sometido a una condición arbitraria de carga, que se comporte de manera totalmente elástica y que contenga una fisura, la propagación de la fisura comenzará cuando la disminución de energía potencial elástica que experimente el cuerpo por unidad de espesor y por unidad de longitud de avance del vértice de la fisura, sea igual o mayor al incremento de energía superficial por unidad de espesor y por unidad de longitud de avance de la fisura que se producirá como consecuencia de la creación de las nuevas superficies debidas a dicha propagación”*[4].

Para analizar la formulación de Griffith se considera una placa semi-infinita homogénea e isotrópica, de módulo elástico E , con una grieta central de forma elíptica de longitud $2a$, que es deformada elásticamente por esfuerzos de tracción σ como se muestra en la siguiente figura.

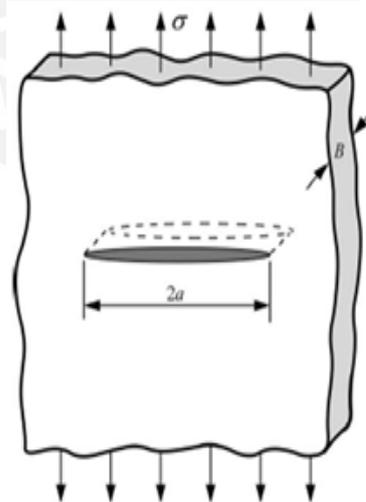


Figura 1. 3 Placa semi-infinita homogénea e isotrópica con fisura pasante elíptica $2a$ (Mecánica de la Fractura: Fundamentos y aplicaciones, T.L. Anderson)

En este caso, a partir de la solución de Inglis (1913), Griffith encontró que la energía elástica (U) almacenada en la placa por unidad de espesor es:

$$U = \frac{\pi\sigma^2 a^2}{E} \quad (1.1)$$

En un proceso de fractura completamente frágil (sin deformación plástica) la energía de fractura es la energía necesaria para crear dos superficies de fractura; una por cada cara de la grieta, de modo que la energía almacenada se convierte en energía de superficie (γ); así, el cambio de la energía es:

$$\Delta U = U + 4\gamma_s a \quad (1.2)$$

Al propagarse la grieta se requiere que la rapidez de conversión de energía almacenada al menos sea igual a la rapidez de creación de energía de superficie. Matemáticamente esto se expresa como:

$$\frac{d\Delta U}{da} = 0 \quad (1.3)$$

Al sustituir términos y resolver para el esfuerzo se obtiene la ecuación del esfuerzo de fractura de Griffith.

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a}} \quad (1.4)$$

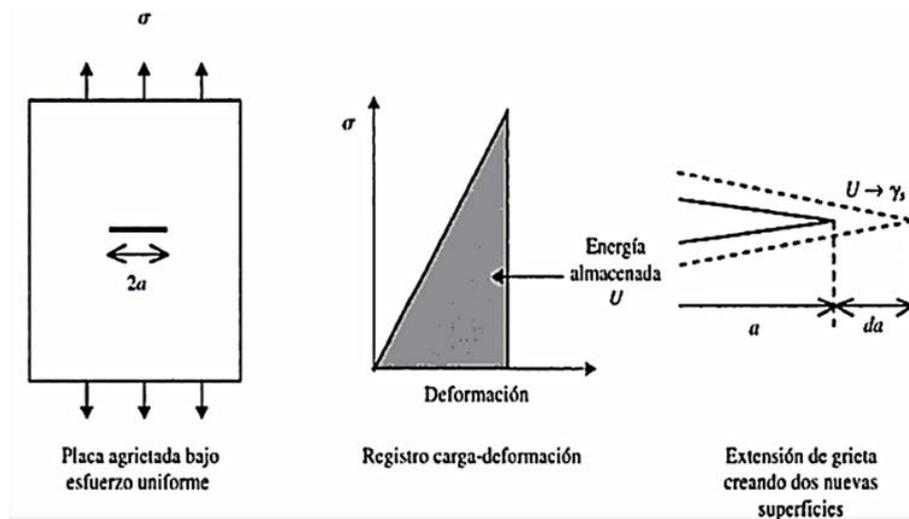


Figura 1. 4 Modelo de Griffith de fractura frágil (Mecánica de la fractura, Gonzales Velásquez).

Posteriormente, Orowan e Irwin reconocieron que siempre existía una componente de energía de deformación plástica que debía ser tomada en cuenta, modificando la ecuación de Griffith al incluir el término ϵ_p , que representa la energía necesaria para deformar el material, obteniendo la siguiente expresión:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E(\gamma_s + \epsilon_p)}{\pi a}} \tag{1.5}$$

La dificultad que presenta el criterio de Griffith es su enorme limitación para evaluar experimentalmente la energía de superficie, por lo que no pudo aplicarse extensamente; sin embargo, este razonamiento hizo dos aportaciones fundamentales:

- La ecuación de Griffith provee una relación entre el esfuerzo aplicado y el tamaño de grieta, del tipo $\sigma \propto \left(\frac{1}{\sqrt{a}}\right)$, la cual ha sido comprobado.
- La fractura resulta de un proceso de conversión de energía, que no depende solamente del esfuerzo, sino también del tamaño de la grieta.

1.1.4. Factor de intensidad de tensiones (K)

Un análisis elástico-lineal da como resultado la distribución de tensiones en el frente de un defecto. El resultado analítico más sencillo es para una placa infinita con una

fisura de doble frente de longitud $2a$, bajo un estado tensional uniforme como el mostrado en la figura 1.5. En este caso, modo I, el estado tensional viene dado por las expresiones aproximadas:

$$\sigma_{xx} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} x \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{3\theta}{2} \right] \quad (1.6)$$

$$\sigma_{yy} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} x \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{3\theta}{2} \right] \quad (1.7)$$

$$\tau_{xy} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} x \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (1.8)$$

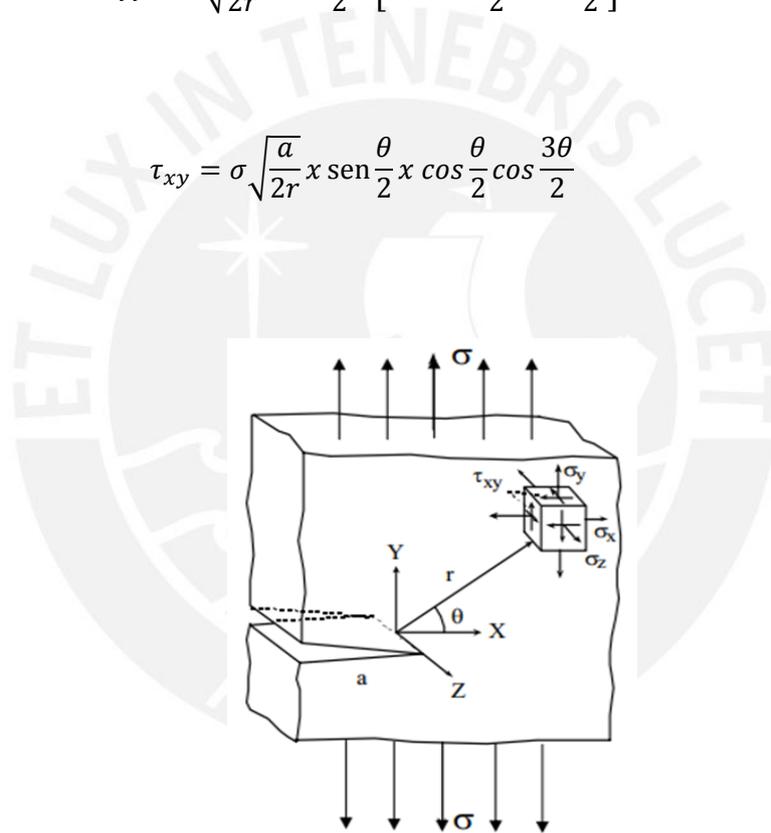


Figura 1. 5 Estado tensional en la proximidad del fondo de fisura (Evaluación de la integridad estructural de componentes sometidos a condiciones de bajo confinamiento, Sergio Cicero Gonzáles)

Estas expresiones representan el primer término de los desarrollos en serie de la solución exacta (serie de Williams [6]). Además para placas delgadas (tensión plana) se tiene:

$$\sigma_z = 0 \quad (1.9)$$

Y para placas gruesas (deformación plana):

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (1.10)$$

De la misma manera, el estado de deformaciones de dicha zona se puede derivar de las expresiones que establecen los desplazamientos en la misma:

$$u = \frac{\sigma}{2E} \sqrt{\frac{ar}{2}} (1 + \nu) \left[(2K - 1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right] \quad (1.11)$$

$$v = \frac{\sigma}{2E} \sqrt{\frac{ar}{2}} (1 + \nu) \left[(2k + 1) \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} - \operatorname{sen} \frac{3\theta}{2} \right] \quad (1.12)$$

Siendo, en deformación plana

$$K = 3 - 4\nu \quad (1.13)$$

Y en tensión plana

$$K = \frac{3 - \nu}{1 + \nu} \quad (1.14)$$

El valor del desplazamiento en la tercera dirección, w , es nulo en deformación plana mientras que en tensión plana resulta

$$w = -\frac{\nu}{E} \int (\sigma_x + \sigma_y) dz \quad (1.15)$$

Las expresiones anteriores pueden expresarse en función de una variable que aparece como una nueva magnitud física, con dimensión y significado propio. Se trata del factor de intensidad de tensiones K , que para la placa plana infinita estudiada y representada en la figura 1.5, que se encuentra en modo I, viene dado por la expresión

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1.16)$$

Las unidades más comúnmente usadas son $MPa\sqrt{m}$ y $Ksi\sqrt{pulg}$; siendo el factor de conversión entre una y otra:

$$1 \text{ Mpa}\sqrt{\text{m}} = 1.098 \text{ Ksi}\sqrt{\text{pulg}} \quad (1.17)$$

El factor de intensidad de tensiones (K) es el parámetro más significativo de la mecánica de fractura lineal-elástica, ya que define la magnitud de los esfuerzos alrededor de una grieta. K determina, por lo tanto, el efecto de introducción de una grieta en una estructura, ya que una vez conocido K , el campo de esfuerzos alrededor de una grieta queda definido por completo, según estas expresiones:

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^I(\theta) \quad (1.18)$$

$$u_i(r, \theta) = \frac{K_I}{2E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} (1 + \nu) \zeta_i^I(\theta) \quad (1.19)$$

Donde $f_{ij}^I(\theta)$ y $\zeta_i^I(\theta)$ son funciones de la orientación propias del modo I, cuyo valor se puede deducir por comparación con las expresiones 1.6 y 1.18.

Las expresiones para el factor de intensidad de tensiones pueden llegar a ser bastante complicadas, en particular para cuerpos de dimensiones finitas con geometrías complicadas. Frecuentemente el factor de intensidad de esfuerzos puede expresarse como:

$$K = P g(B, W) f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (1.20)$$

Donde:

B : espesor del cuerpo.

W : ancho del cuerpo

Las funciones $f\left(\frac{a}{W}\right)$ y $g(B, W)$, presentan una gran variedad de formas, siendo las más comunes las polinomiales y trigonométricas.

Partiendo de la solución del factor de intensidad de tensiones es posible conocer la variación de los esfuerzos de tensión frente a una grieta. En el caso de una placa infinita con una grieta central en modo I la distribución de los esfuerzos es como se aprecia en la siguiente figura

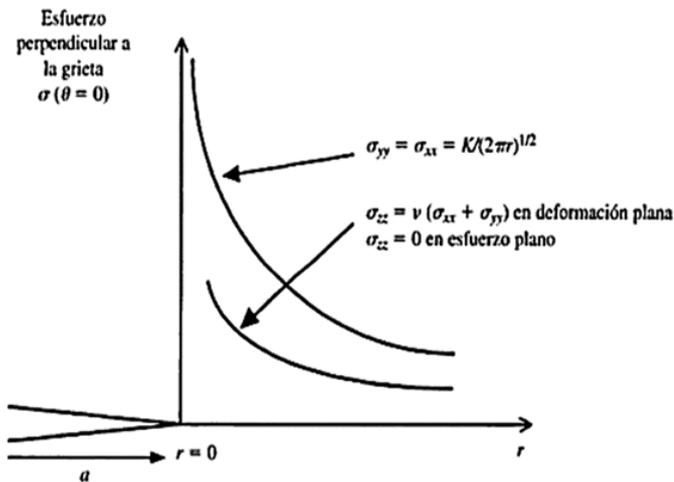


Figura 1. 6 Variación de los esfuerzos frente a la punta de una grieta en modo I, en un cuerpo con deformación elástica-lineal (Mecánica de la fractura, Gonzales Velásquez)

Se aprecia que muy próximo a la punta de la grieta los esfuerzos son muy grandes, lo que facilita el proceso de fractura cuando ya se tiene una grieta en un cuerpo. También se observa que el esfuerzo en la dirección perpendicular a la grieta (σ_{yy}) es el más grande, y los dos esfuerzos (σ_{xx} y σ_{zz}) son de tensión también, por lo tanto, en la punta de la grieta existe un estado triaxial de esfuerzos para el caso de deformación plana. En esfuerzo plano, la componente σ_{zz} es cero y por lo tanto la componente de la deformación zz no es cero, de manera que se tiene una deformación triaxial.

Por lo expuesto se establece un principio de similitud que es base de toda aplicación práctica de la mecánica de fractura. Dicho principio establece que si dos grietas diferentes, en cuerpos diferentes y cargas diferentes, poseen la misma K , su comportamiento será idéntico, ya que poseen el mismo campo de esfuerzos. Las únicas restricciones son que el modo de desplazamiento de grietas debe ser el mismo y que las deformaciones en los cuerpos sean elásticas [4].

A continuación se presentan expresiones para la obtención del factor de intensidad de tensiones en geometrías y condiciones de carga simples.

Tabla 1. 1 Factor de la intensidad de tensiones para geometrías simples (Mecánica de la fractura, Gonzales Velásquez)

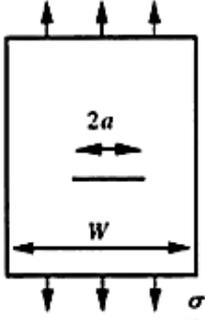
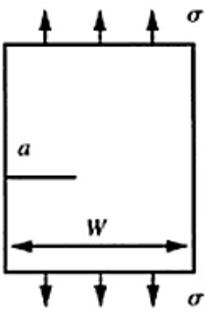
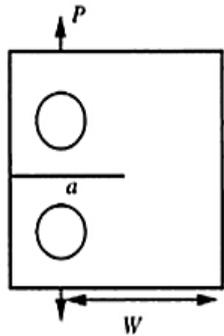
Geometría	K
	<p><i>Placa con grieta central:</i></p> $K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \left(\sec \frac{\pi a}{W} \right)^{1/2}$
	<p><i>Placa con grieta lateral:</i></p> $K_I = Y \sigma \sqrt{a}$ $Y = 1.99 - 0.4a' + 18.7a'^2 - 34.8a'^3 + 53.85a'^4$ $a' = \left(\frac{a}{W} \right)$
	<p><i>Placa probeta</i></p> $K_I = \frac{P}{B\sqrt{W}} \frac{[0.886 + 4.64a' - 13.32a'^2 + 14.72a'^3 - 5.6a'^4]}{(1 - a')^{3/2}}$ $a' = \left(\frac{a}{W} \right)$

Tabla 1. 2 Factor de la intensidad de tensiones para geometrías simples (Mecánica de la fractura, Gonzales Velásquez)

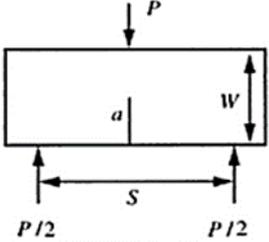
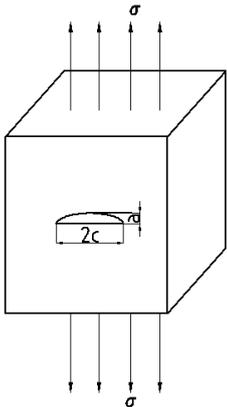
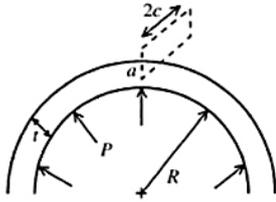
Geometría	K
	<p><i>Viga en flexión:</i></p> $K_I = \frac{PS}{BW^{3/2}} \frac{3a'^{1/2}[1.99 - a'(1 - a')(2.15 - 3.93a' + 2.7a'^2)]}{(1 - a')^{3/2}}$
	<p><i>Grieta semi-elíptica con esfuerzo (σ) perpendicular a la grieta.</i></p> <p><i>Semieje menor:</i></p> $K_{I(\text{máx})} = 1.12 \frac{\sigma}{\phi} \sqrt{\pi a} \text{ (interior)}$ <p><i>Semieje mayor:</i></p> $K_{I(\text{mín})} = 1.12 \frac{\sigma}{\phi} \sqrt{\pi \frac{a^2}{c}} \text{ (superficie)}$ $\phi = \frac{3\pi}{8} + \frac{\pi a^2}{8 c^2}$

Tabla 1. 3 Factor de la intensidad de tensiones para geometrías simples (Mecánica de la fractura, Gonzales Velásquez)

Geometría	K
	<p>Grieta axial-radial en cilindro con presión interna(P)</p> $K_I = \frac{PR}{t} \sqrt{\left(1 + 1.61 \frac{c^2}{Rt}\right) \pi a}$

1.1.5. Tenacidad a la fractura

La presencia de entallas, fisuras y defectos generan una concentración local de esfuerzos alrededor de los mismos, los cuales son proporcionales a la sollicitación exterior. Si esta aumenta gradualmente entonces la zona cargada localmente aumentará de igual modo, hasta llegar a condiciones que resultan críticas en el entorno del defecto, que no es otra que la del propio material. Estas condiciones generan un estado tensional, el cual trae como consecuencia un factor de intensidad crítico llamado tenacidad a la fractura que representa la resistencia del material a la fractura elástica lineal ante la presencia de un defecto. La tenacidad a la fractura se denomina K_{IC} cuando un componente trabaja en condiciones de deformación plana y está presente un modo I de fractura.

La tenacidad a la fractura K_{IC} de un material es obtenido mediante procedimientos experimentales según ASTM E-399 [7] y la norma británica BS 7448 [8]. La prueba consiste en aplicar carga hasta la fractura de una probeta que contiene una grieta previamente desarrollada por fatiga dentro de una entalla mecanizada (ver figura 1.7). Se registra la carga (P) contra el desplazamiento de la abertura de la entalla (v), obteniendo la carga máxima antes de la falla, mientras que de la probeta se mide el tamaño de la grieta en el punto de fractura. La carga de fractura y el tamaño crítico de grieta se sustituyen en la expresión de K y se determina K_{IC} .

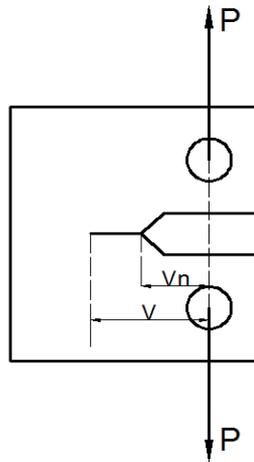


Figura 1. 7 Probeta compacta de tensión (CT) (Norma ASTM E399)

1.2. Procedimientos de evaluación de componentes fisurados

Los procedimientos de evaluación de componentes fisurados son empleados para evaluar la “idoneidad para el servicio” de componentes a lo largo de su vida operativa siendo la Resistencia de Materiales y la Mecánica de la Fractura bases de dicha evaluación. Un procedimiento de evaluación de la integridad estructural de un componente es capaz de proporcionar un equilibrio entre la economía y la seguridad evitando desastres con consecuencias lamentables o reparaciones innecesarias.

1.2.1. Clasificación de los procedimientos de evaluación

En la actualidad se cuenta con una variedad de procedimientos que permiten evaluar la integridad estructural de un componente que contiene un determinado defecto. La mayor parte de estos procedimientos pueden dividirse en dos grandes grupos: selectivos y comprensivos. Los primeros están dirigidos a la toma de una decisión rápida con una mínima cantidad de información, mientras que los segundos requieren un estudio detallado y aportan una solución integradora al problema.

1.2.1.1. Procedimientos selectivos

Se trata de métodos muy rápidos y fáciles de aplicar que precisan una mínima cantidad de datos de entrada y según el resultado obtenido pueden requerir de un análisis más profundo del problema. A continuación se describen los más utilizados.

Diagrama J-T

La integral J determina la energía de fractura de un cuerpo sin estar restringido por condiciones de linealidad, involucrando deformaciones tanto elásticas como plásticas.

Generalmente empleado para vasijas a presión de reactores nucleares de agua ligera, se basa en cálculo simplificado de la curva J-T (Integral J frente al módulo de desgarro) aplicada sobre el componente y comparada con la curva J-T de la resistencia a la fractura del material, siendo la intersección de las curvas mencionadas punto de partida para la evaluación de la carga de inestabilidad.

La integral J mencionada puede ser hallada aplicando la siguiente expresión

$$J = \int_{\Gamma} (W dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds) \quad (1.21)$$

Donde:

W : es la energía por unidad de volumen

$$W = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (1.22)$$

Donde σ_{ij} y ε_{ij} representan los tensores y deformaciones respectivamente

T_i : son los vectores de tracciones

$$T_{ij} = \sigma_{ij} n_j \quad (1.23)$$

Donde n_j representa las componentes de un vector unitario normal a Γ .

u_i : son los componentes del vector desplazamiento

ds : es un elemento diferencial de Γ

A continuación se presenta en la figura 1.8 un esquema, el cual se definen gráficamente alguno de los términos de la integral J.

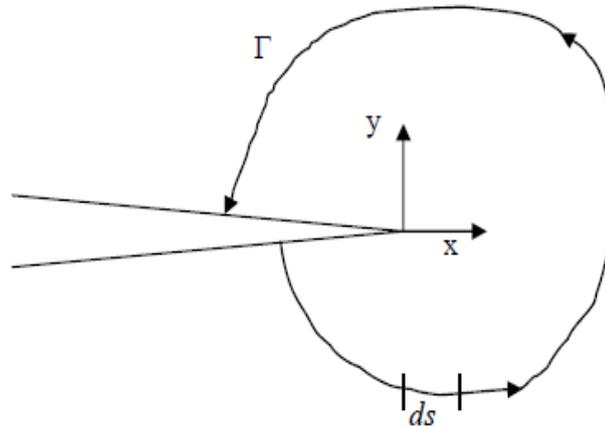


Figura 1. 8 Contorno arbitrario alrededor del frente de fisura

Los módulos de desgarro se definen a través de las siguientes expresiones

Siendo el módulo de desgarro aplicado la siguiente expresión

$$T_{app} = \frac{E}{\sigma_f^2} \frac{\partial J_{app}}{\partial a} \quad (1.24)$$

Siendo el módulo de desgarro del material la siguiente expresión

$$T_R = \frac{E}{\sigma_f^2} \frac{\partial J_R}{\partial \Delta a} \quad (1.25)$$

La siguiente figura 1.9 se representa esquemáticamente un ejemplo típico del diagrama J-T que incluye las curvas de desgarro, tanto aplicado (T_{app}) como del material (T_R), frente a J y J_R respectivamente.

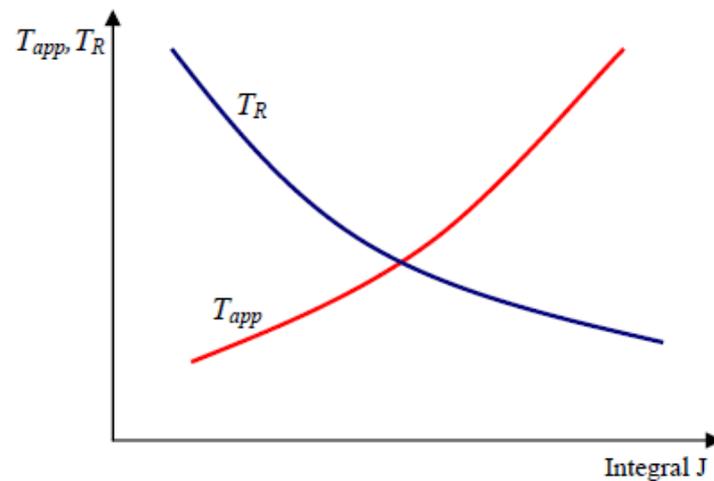


Figura 1. 9 Representación esquemática del diagrama J- T

KWU

Este procedimiento es aplicable a sistemas de tuberías y postula que los materiales cuya resiliencia en un ensayo de impacto tipo Charpy, C_v , supere el valor de 45 J siempre alcanzan la carga de colapso plástico. Esta hipótesis ha sido confirmada por los autores a través del análisis de gran cantidad de casos. La carga de colapso adoptada ha de ser un valor suficientemente conservador

1.2.1.2. Procedimientos comprensivos

Se trata de procedimientos que contemplan cálculos y se presentan en forma de manual.

Dentro de este tipo de procedimientos se pueden distinguir dos enfoques en cuanto a la metodología de evaluación. Los procedimientos basados en la utilización del Diagrama de Fuerza Motriz de Agrietamiento (*Crack Driving Force Diagram*, CDFD) y los procedimientos basados en el uso del Diagrama de Evaluación de Fallo (*Failure Assessment Diagram*, FAD).

A. Procedimientos basados en el uso del diagrama CDFD

El Diagrama de Fuerza Motriz de Agrietamiento compara la integral J aplicada (J_{app}) y la curva de tenacidad del material (J_R), resultando en la representación del fenómeno de propagación de la fisura.

La obtención del (J_{app}) se realiza empleando la expresión xxxx y la tenacidad del material (J_R) a través de ensayos.

A continuación se representa en la figura 1.10 el diagrama CDFD.

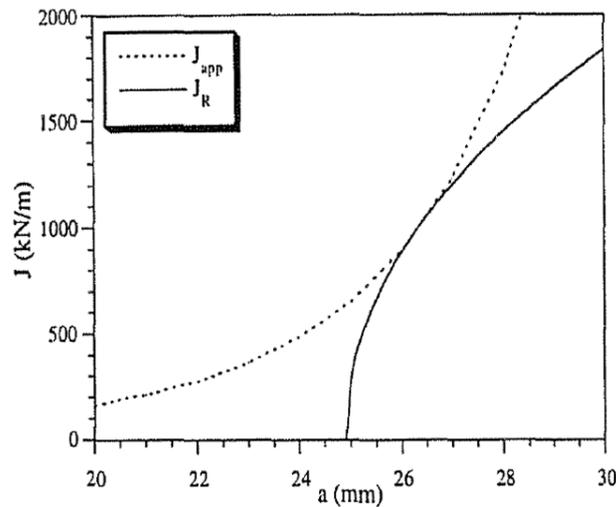


Figura 1. 10 Diagrama CDFD (Análisis comparativo de los procedimientos de evaluación de la integridad estructural de componentes fisurados, J. Ruiz Ocejo, M. A. González-Posada, I. Gorrochategui, F. Gutiérrez-Solana)

“Con referencia a la aplicación de los procedimientos que siguen este diagrama, una desventaja que se señala habitualmente es la dificultad de encontrar o, en otros casos, de aplicar las funciones que evalúan la integral-J aplicada. Esta situación se confirma fundamentalmente para el método EPRI original, sin embargo, ETM ha resuelto esta desventaja estimando la integral-J aplicada por medio del factor de intensidad de tensiones. De este modo, el régimen elasto-plástico se estima a partir del elástico partiendo de soluciones de K aplicado más fáciles de obtener”. [9]

EPRI

Representa un método de cálculo de la integral J aplicada (J_{app}) para un elemento fisurado sometido a una determinada carga y valido para aquellos materiales que cumplan una ley de tipo Ramberg-Osgood.

La obtención de (J_{app}) se realiza mediante la suma de los componentes elásticos y plásticos, tal como se aprecia en la siguiente expresión.

$$J_{app} = J_e + J_p \quad (1.26)$$

Donde las expresiones J_e representan la componente elástico y J_p el componente plástico y son halladas a través de las siguientes expresiones

$$J_e = \frac{K_I^2(a_{eff})}{E'} \quad (1.27)$$

$$J_p = \alpha \sigma_0 \varepsilon_0 c(a/c) h_1 \left[\frac{\sigma}{\sigma_0} \right]^{n+1} \quad (1.28)$$

Siendo a_{eff} la longitud de fisura efectiva con corrección de Irwin, E' el módulo de elasticidad (E en tensión plana y $E/(1 - \nu^2)$ en deformación plana); y a, b y c factores geométricos del componente.

La expresión h_1 depende de la configuración geométrica y estructural del componente y del coeficiente de endurecimiento del material y se encuentra tabulada para diversas geometrías.

ETM

Representa un método de cálculo de la integral J, diferenciándose del EPRI en la obtención del componente plástico de dicha integral, ya que la hallazgo de dicho componente se basa en el factor de intensidad de tensiones K_I , es decir de su propia componente elástica.

B. Procedimientos basados en el Diagrama de Evaluación de Fallo

El Diagrama de Evaluación de Fallo (*Failure Assessment Diagram*, FAD) representa un análisis gráfico que se evalúa de forma simultánea la fractura y el colapso plástico a través de dos variables adimensionales K_r y L_r , donde.

K_r representa el ratio de tenacidad y está definido por :

$$K_r = \frac{(K_I^P + \phi K_I^{SR})}{k_{mat}} \quad (1.29)$$

Siendo K_I^P el factor de intensidad de tensiones debido a cargas primarias, K_I^{SR} es el factor de intensidad de tensiones debido a cargas secundarias y residuales, ϕ es el factor de corrección por plasticidad, y K_{mat} la tenacidad a la fractura del material.

Por otro lado L_r representa el ratio de carga y está definido por:

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_{ys}} \tag{1.30}$$

Siendo σ_{ref} el esfuerzo de referencia y σ_{ys} representa el límite elástico del material.

El diagrama de fallo está definido por la siguiente expresión

$$K_r = [1 - 0.14(L_r)^2]\{0.3 + 0.7 \exp[-0.65(L_r)^6]\} \tag{1.31}$$

A continuación en la figura 1.11 se muestra un esquema con las variables involucradas en un diagrama FAD

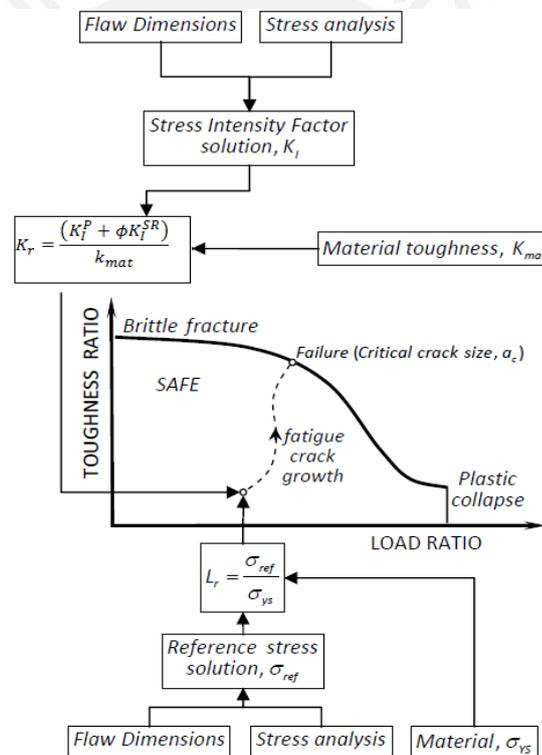


Figura 1. 11 Diagrama FAD (Aplicación del procedimiento ASME-API 579 para el diseño en fatiga de vasijas de alta presión bobinada, J. M. Alegre)

Algunos de los procedimientos más representativos que se basan en el diagrama FAD son el código R6, la norma Británica BS7910 y la norma API 579, siendo el primero de ellos un procedimiento de cálculo o análisis, mientras que los dos últimos son métodos que contienen recomendaciones no solo para la evaluación sino también brindan directivas para la inspección, mantenimiento o reparación de componentes en servicio.

A continuación se describe brevemente los procedimientos mencionados.

Código R6

Fue propuesto por Milne y presentado como un reporte técnico del Central Electricity Generating Board de Inglaterra en 1976. Este reporte recibió la denominación R6, por lo que es comúnmente conocido como código R6. Actualmente el código ha sido objeto de varias revisiones y ha sido optado por la industria como código de evaluación de la integridad de sus estructuras y equipos agrietados.

El procedimiento de cálculo que se realiza en 3 categorías (frágil, elastoplástica o colapso). La representación gráfica de cualquiera de las tres categorías de análisis se lleva a cabo haciendo uso de los Diagramas de Fallo, ya sea mediante el uso de una curva límite genérica por defecto (Opción 1), cuando no se conoce la curva tensión-deformación del material, o a través de curvas específicas dependientes de las características mecánicas del material a considerar (Opciones 2 y 3).

Opción 1

$$K_r = [1 + 0.5L_r^2]^{-0.5} [0.3 + 0.7\exp(-0.6L_r^6)] \quad (1.32)$$

Opción 2

$$K_r = \left[\frac{E\varepsilon_{ref}}{L_r\sigma_Y} + \frac{L_r^3\sigma_Y}{2E\varepsilon_{ref}} \right]^{-0.5} \quad (1.33)$$

Donde ε_{ref} es el valor de la deformación verdadera obtenida de la curva tensión deformación para un valor de la tensión verdadera $L_r \cdot \sigma_Y$, E es el módulo de elasticidad del material y σ_Y es el límite elástico del material.

Opción 3

$$K_r = \left(\frac{J_{app}}{J_e} \right)^{-0.5} \quad (1.34)$$

Donde J_{app} representa la integral J aplicada y J_e es la parte elástica correspondiente

Norma BS7910

Presenta gran similitud con el código R6, ya que también presenta 3 niveles de tratamiento similares a las categorías de análisis de dicho procedimiento,

denominados preliminar, normal y avanzado en función de la precisión y profundidad de análisis a realizar.

El procedimiento de cálculo que se realiza en el primer nivel es similar a los procedimientos selectivos y no se emplea el diagrama FAD; la representación de los cálculos para los otros niveles de análisis (normal y avanzado) se realiza haciendo uso del Diagrama de Fallo por medio de las 3 opciones disponibles, las cuales son idénticas a las propuestas por el código R6.

Norma API 579

Al igual que los anteriores procedimientos tiene por objetivo evaluar la idoneidad para el servicio de componentes fisurados bajo determinadas condiciones de servicio. Es publicado por el “*American Petroleum Institute*” y representa una de los procedimientos más empleados en la región por su gran difusión y buena prestancia en la evaluación de elementos fisurados.

A continuación se realiza una descripción más a detalle del procedimiento establecido por la norma API 579.

1.2.2. Procedimiento de evaluación de componentes fisurados según API 579

Según la norma API 579, la integridad estructural se entiende por el estado en el que se encuentra la región afectada por la fisura y caracterizada por el estado tensional, así como también por parámetros propios de la mecánica de la fractura, como lo es el factor de intensidad de tensiones (K). En búsqueda de evaluar dicha integridad estructural la norma API 579 emplea el procedimiento Fitness for service, el cual realiza evaluación cuantitativa ingenieril con un enfoque multidisciplinario para determinar la integridad estructural de un equipos presurizados que contengan defectos, con diferentes configuraciones de geométricas y sometidas a una serie cargas; con el objetivo de garantizar un nivel aceptable de seguridad, proporcionar información útil para la determinación de la vida remanente y optimizar de la inspección de los equipos mencionados.

API 579 trata equipos con una gran variedad de defectos como son: pérdidas del material, corrosión, fisuras, defectos por soldadura, etc.

De los defectos mencionados, el presente trabajo se enfoca en la evaluación de la integridad estructural de tuberías afectadas por fisuras.

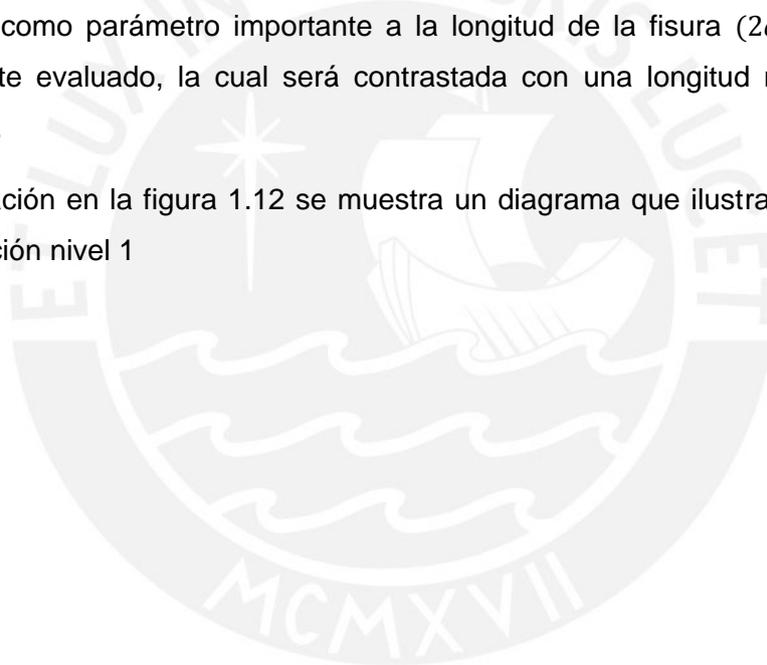
La norma API 579 posee tres niveles para evaluar la integridad estructural de componentes fisurados, la aplicación de cada uno depende de la cantidad de información que se disponga.

A continuación se describe a detalle los tres niveles de evaluación.

1.2.3. Nivel 1 de evaluación

Es un nivel de evaluación conservador, y está diseñado para su utilización con poca información del componente y de las condiciones de operación. En este nivel se considera como parámetro importante a la longitud de la fisura ($2c$) presente en el componente evaluado, la cual será contrastada con una longitud máxima de fisura permisible.

A continuación en la figura 1.12 se muestra un diagrama que ilustra el procedimiento de evaluación nivel 1



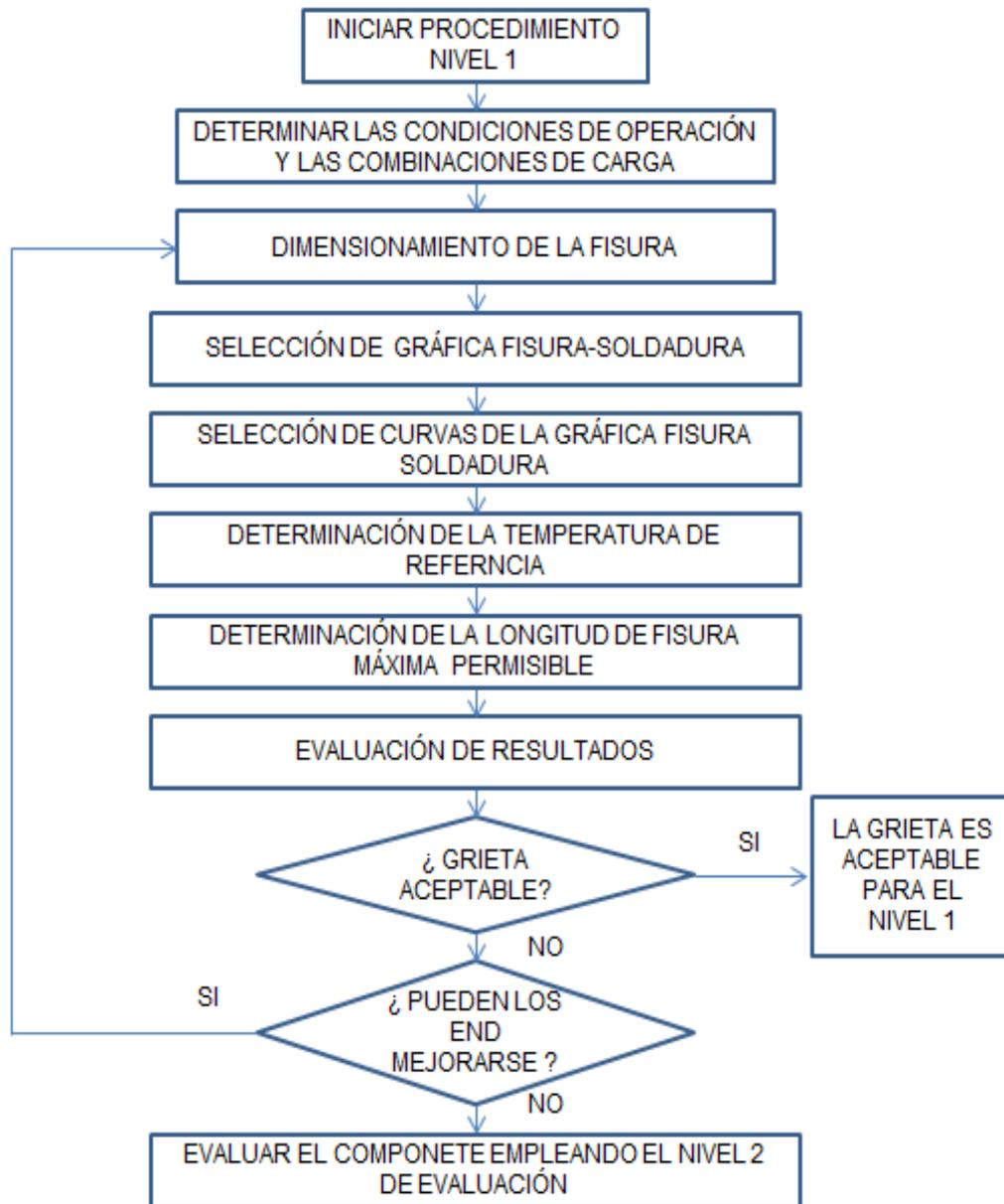


Figura 1. 12 Diagrama del nivel 1 de evaluación

1.2.4. Nivel 2 de evaluación

Es el nivel de evaluación más utilizado y se basa al igual que los procedimientos R6 y BS 7910 en la FAD (*Failure Assessment Diagram*). La obtención del diagrama se da a través de la expresión 1.31 y se realiza la evaluación de la integridad estructural empleando los factores de carga y tenacidad

A continuación se presenta en la figura 1.13 el diagrama FAD obtenido mediante la expresión 1.31 y se realiza la descripción de su uso.

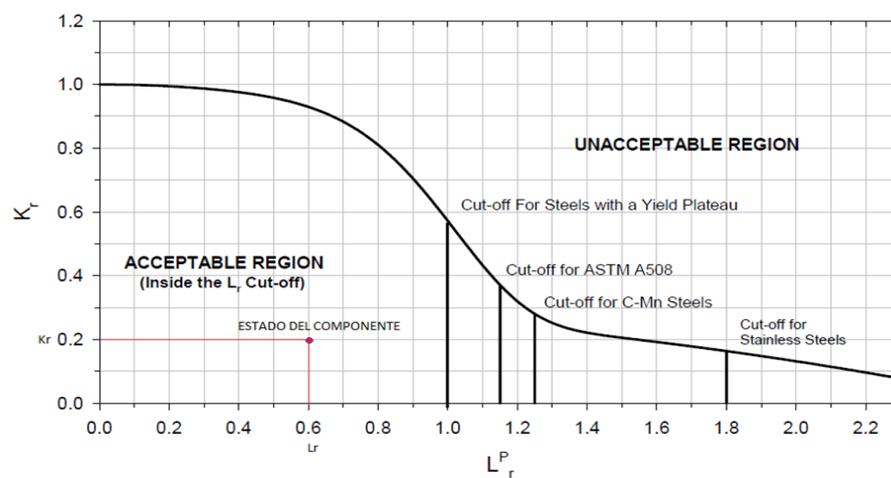


Figura 1. 13 Diagrama FAD (Norma API 579)

Como se puede apreciar en el diagrama mostrado, el componente evaluado se encontrará apto para el servicio, si la intersección de la recta vertical correspondiente al valor de L_r con la recta horizontal correspondiente al valor de K_r se encuentra dentro de la región aceptable, de lo contrario se sugiere una reparación del mismo o en su defecto el reemplazo.

Un diagrama que ilustra el procedimiento de la evaluación nivel 2 es mostrado por la figura 1.13

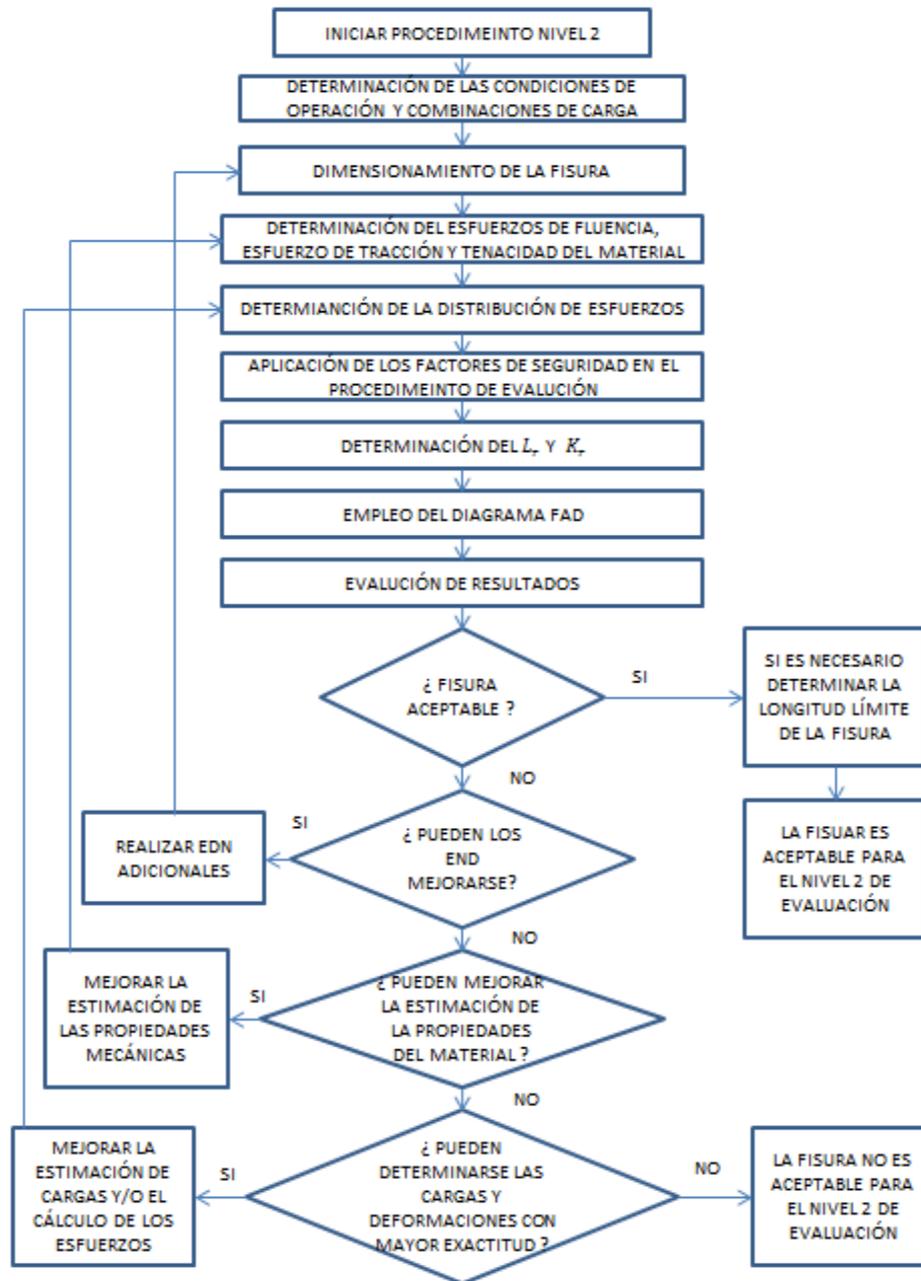


Figura 1. 13 Diagrama del nivel 2 evaluación

1.2.5. Nivel 3 de evaluación

El procedimiento de evaluación nivel 3 proporciona una estimación más robusta de la integridad estructural de un componente fisurado, capaz de contemplar la posibilidad del crecimiento del defecto durante la vida operativa

Este nivel contempla cinco posibles métodos, los cuales son descritos a continuación.

- Método A-Basado en el procedimiento de evaluación nivel 2, emplea coeficientes de seguridad.
- Método B-Basado en el procedimiento de evaluación nivel 2, emplea el diagrama FAD, construido con las propiedades mecánicas reales del material.
- Método C-Basado en el procedimiento de evaluación nivel 2, empleando un diagrama FAD construido con condiciones de carga, geometría, propiedades del material reales.
- Método D-Método que analiza el desgarro dúctil estable en materiales como aceros ferríticos e inoxidables austeníticos.
- Método E-Propone el empleo de procedimientos como :
 - BS 7910
 - R-6
 - The J-integral-Tearing Modulus method

En este presente trabajo de tesis únicamente son empleados los niveles 1 y 2 de evaluación, debido a que se realiza un análisis con carga estática y no se efectúan ensayos para la construcción del diagrama FAD correspondiente al material evaluado.

1.3. Simulación computacional

1.3.1. Introducción

La simulación computacional se ha convertido en los últimos años en una tercera forma de hacer ciencia, que se sitúa en algún punto medio entre los experimentos y la teoría analítica. Es complementaria a estas dos formas tradicionales de metodología científica y se beneficia de ambas para el desarrollo de modelos computacionales suficientemente precisos. Las simulaciones pueden estudiar hoy problemas de fluidos, transferencia de calor, estructuras con relativa facilidad. Por lo mencionado es preciso señalar la gran importancia que ha adquirido la simulación computacional durante estos últimos años en las diferentes ramas de la ciencia e ingeniería.

1.3.2. Simulación numérica

Los objetivos de toda simulación son el estudio de fenómenos y/o la predicción de su evolución en situaciones particulares de interés. Para ello se inicia con la observación del fenómeno, prosiguiendo con un primer nivel de abstracción del mismo, obteniéndose el modelo físico en base a la identificación del sistema, de las fuerzas interiores y la acción externa; obtenido el modelo físico se procede a avanzar a un segundo nivel, el cual es el modelo teórico matemático, este modelo es representado a través de las herramientas provistas por el análisis matemático (ecuaciones diferenciales, integrales, etc). A partir del modelo teórico matemático, es posible proceder a la simulación analógica, que consiste en estudiar un fenómeno distinto, pero regido por las mismas ecuaciones. También es posible, en algunas situaciones ya sea muy simplificada o correspondiente a geometrías muy simples, buscar la solución del problema matemático recurriendo a técnicas analíticas de resolución; dicho procedimiento se denomina simulación analítica.

En muchos problemas prácticos la solución por métodos analíticos no es muy conveniente por lo tedioso y complicado; en consecuencia, puede procederse a discretizar el modelo teórico matemático, para transformar el problema analítico en uno algebraico, y así poder recurrir al uso de la computadora digital, esto se denomina simulación numérica.

Entre los distintos métodos utilizados para discretizar un problema tenemos los siguientes más empleados:

- El método de las diferencias finitas
- El método de los residuos ponderados
- El método de los elementos finitos
- El método de los elementos de contorno

1.3.3. Simulación de la fractura mediante elementos finitos

El método de los elementos finitos consiste en construir el cuerpo a analizar como un ensamble de elementos de tamaño finito, de ahí el nombre; los puntos de unión son llamados nodos y las condiciones de frontera son asignadas a través de desplazamientos y restricciones constantes en nodos selectos. El método calcula los desplazamientos de los nodos al aplicar un desplazamiento predeterminado en los nodos de frontera; conociendo las propiedades elásticas del material, los desplazamientos pueden ser fácilmente convertidos en deformaciones y empleando

las ecuaciones de equilibrio conjuntamente con las fuerzas de interconexión entre cada nodo se puede obtener los esfuerzos. El resultado final es la distribución de desplazamientos, deformaciones y esfuerzos en el cuerpo.

En base al método de los elementos finitos y el conocimiento de Mecánica de la fractura, es posible determinar el estado de la región afectada por la fisura mediante la obtención del factor de intensidad de tensiones (K); dicho factor puede ser estimado a partir de los esfuerzos presentes en la punta de la grieta o los desplazamientos que se den detrás de ella.

A continuación se describe el procedimiento de obtención del factor de tensiones (K) empleando el método de los elementos finitos.

Se asume un sistema de coordenadas local, tal como se muestra en la siguiente figura.

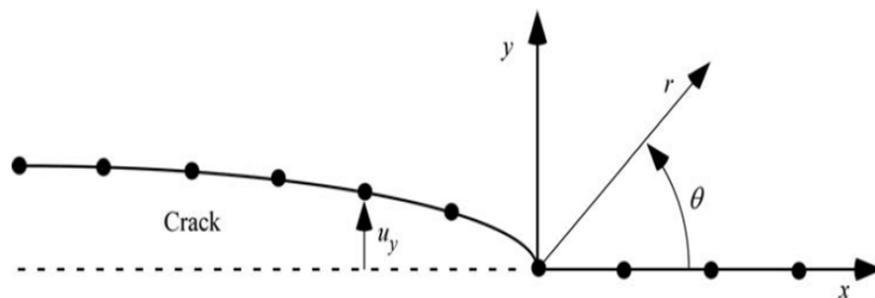


Figura 1. 14 Sistema de coordenadas local para esfuerzos y desplazamientos en la punta de la grieta en un elemento finito (Norma API 579)

Considerando un cuerpo fisurado sujeto a un Modo I de fractura y el plano de fisura ($\theta = 0$), K_I es relacionado con el esfuerzo normal al plano de fisura de la siguiente manera:

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} [\sigma_{yy} \sqrt{2\pi r}] \quad (\theta = 0) \quad (1.35)$$

El factor de intensidad de tensiones se puede inferir representado gráficamente la expresión que se encuentra dentro del corchete y extrapolando para $r=0$, tal como se muestra en la figura 1.13; alternatively, K_I puede ser estimado a partir de una extrapolación similar del desplazamiento de la apertura de la grieta u_y . Para la condición de deformación plana, K_I es estimado a partir de la siguiente extrapolación:

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \left[\frac{Eu_y}{4(1-\nu^2)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \right] \quad (\theta = \pi) \quad (1.36a)$$

Para esfuerzo plano, K_I es estimado de la siguiente manera:

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \left[\frac{Eu_y}{4} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \right] \quad (\theta = \pi) \quad (1.36b)$$

Las expresiones 1.35 y 1.36 se derivan de la solución del esfuerzo y desplazamiento en Modo I con el valor de $(\theta = 0)$ y $(\theta = \pi)$ para esfuerzo normal y desplazamiento normal respetivamente.

Las ecuaciones 1.36a y 1.36b tienden a dar estimaciones más precisas de K_I que la ecuación 1.35; esto debido a la singularidad de los esfuerzos para valores de r próximos a cero y la proporcionalidad que se da entre los desplazamientos y el valor de \sqrt{r} cerca de la punta de la grieta.

La singularidad descrita, la cual genera la presencia de esfuerzos elevados y causa estimaciones del factor de intensidad de tensiones no tan precisas, es superada mediante el empleo de elementos singulares en la discretización del componente fisurado, dichos elementos presentan cambios en la disposición de los nodos en comparación a los elementos comúnmente utilizados en la discretización de componentes continuos; empleándose para un análisis elástico lineal el elemento presente la figura 1.15 y el cual presenta nodos a una distancia igual a la cuarta parte del tamaño del elemento. [10]

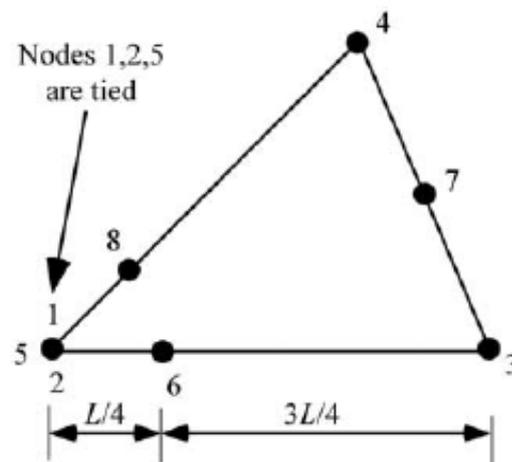


Figura 1. 15 Elemento singular



CAPÍTULO 2

PARTICULARIDADES DE LA EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE TUBERÍAS FISURADAS

La industria actual que cuenta con una alta tecnificación, como son la petroquímica, químicas, nucleares, entre otras; poseen equipos que muchas veces operan a muy alta presión y temperatura, bajo condiciones desfavorables que generan la presencia de defectos, tales como fisuras. El control de los parámetros operativos, de la calidad del material y la fabricación de los equipos, así como también contemplar planes de mantenimiento y de la integridad estructural de los equipos; conforman factores importantes que hacen a las industrias entidades seguras.

El presente capítulo tiene por finalidad la implementación de procedimientos de evaluación de la integridad estructural de tuberías fisuradas basados en las recomendaciones propuestas por API 579, específicamente en el apartado nueve de dicha norma. El procedimiento desarrollado contempla las particularidades de un componente cilíndrico sometido a cargas de presión interna que presenta una fisura semi elíptica ubicada en su superficie exterior. El siguiente capítulo se describirá el desarrollo de modelos computacionales que permiten complementar la evaluación de integridad estructural mediante simulación computacional por el método de los elementos finitos.

2.1. Generalidades

Los procedimientos de evaluación de componentes fisurados del estándar API 579 son utilizados para comparar la relativa tolerancia a las grietas y evaluar el riesgo de fractura frágil de un componente. Dichos procedimientos de evaluación están basados en la metodología del Diagrama de Evaluación de Fallo FAD (Failure Assessment Diagram).

El estándar API 579 define tres niveles de evaluación que dependen de la cantidad de la información requerida, de las capacidades del personal evaluador y de la complejidad del análisis. El nivel 1 contempla un análisis de tipo conservador con un mínimo de información disponible. Para un nivel 2, la evaluación requiere de resultados precisos provenientes de métodos y técnicas analíticas que aborden la determinación del factor de intensidad de tensiones. El nivel 3 exige información detallada del caso a analizar y se recomienda el uso de técnicas avanzadas de análisis, además si se sospecha de una actividad de crecimiento potencial de la fisura debido a condiciones de carga, como fuerzas cíclicas.

El presente capítulo describe procesos de evaluación nivel 1 y 2 de tuberías fisuradas implementados bajo las recomendaciones de API 579. Cabe señalar que el procedimiento nivel 3 no forma parte del alcance de la tesis debido a que se requiere de ensayos de laboratorio, pero se pretende que trabajos de investigación en un futuro cercano traten el tema.

Los procedimientos evaluación nivel 1 y 2 son aplicables a componentes que cumplan los siguientes requerimientos:

- El componente debe haber sido diseñado y/o fabricado bajo las directrices de un estándar reconocido, ASME y API.
- El componente no debe estar operando en un rango de creep (deformación por fluencia lenta).
- El efecto de cargas dinámicas no significativas.
- La fisura no está sometida a condiciones de carga y ambientales que provocarían su propagación.

Los siguientes requerimientos adicionales deben ser satisfechos para que un componente sea evaluado con el nivel 1.

- El componente se trata de una placa, cilindro o esfera.

- El cilindro y esfera están limitados para geométricas que cumplan $R/t \geq 5$ donde R es el radio interior y t es el espesor de pared del componente.
- El espesor de pared del componente donde se ubique la fisura es menor a 38 mm.
- La longitud máxima permisible de la fisura es 200mm.

2.2. Procedimiento de evaluación nivel 1

El procedimiento descrito a continuación puede ser usado para determinar la aceptación de una fisura de acuerdo a una evaluación nivel 1.

2.2.1. Paso 1. Identificación de las condiciones de operación

Determinar la carga y temperatura a las cuales se encuentra sometida la tubería

2.2.2. Paso 2. Caracterización de la fisura

Determinar el tipo y parámetros geométricos de la fisura. El procedimiento ha sido implementado para el tratamiento de una fisura semi elíptica superficial en dirección transversal (Fig. 2.1 a) y longitudinal (Fig. 2.1 b) con longitud $2c$ y profundidad a , como se aprecia en la Figura 2.1.

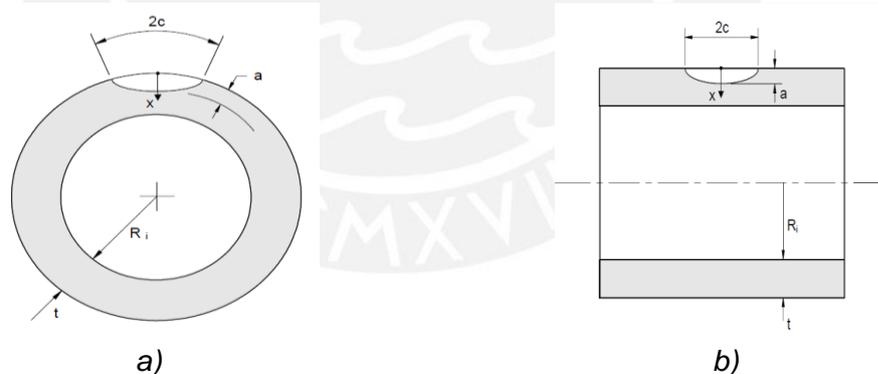


Figura 2.1 Tubería con fisura semi elíptica superficial en dirección (a) transversal y (b) longitudinal.

2.2.3. Paso 3. Selección de gráficas Cilindro-Soldadura-Fisura

De acuerdo al tipo de componente, la presencia de una unión soldada y la orientación de la fisura, se proponen diferentes gráficas como parte de la metodología de evaluación. Las gráficas propuestas por la norma para un componente cilíndrico son las siguientes:

- Cilindro - junta longitudinal - fisura transversal.
- Cilindro - junta longitudinal - fisura longitudinal.
- Cilindro - junta circunferencial - fisura transversal. (Figura 2.2 a)
- Cilindro - junta circunferencial - fisura longitudinal. (Figura 2.2 b)

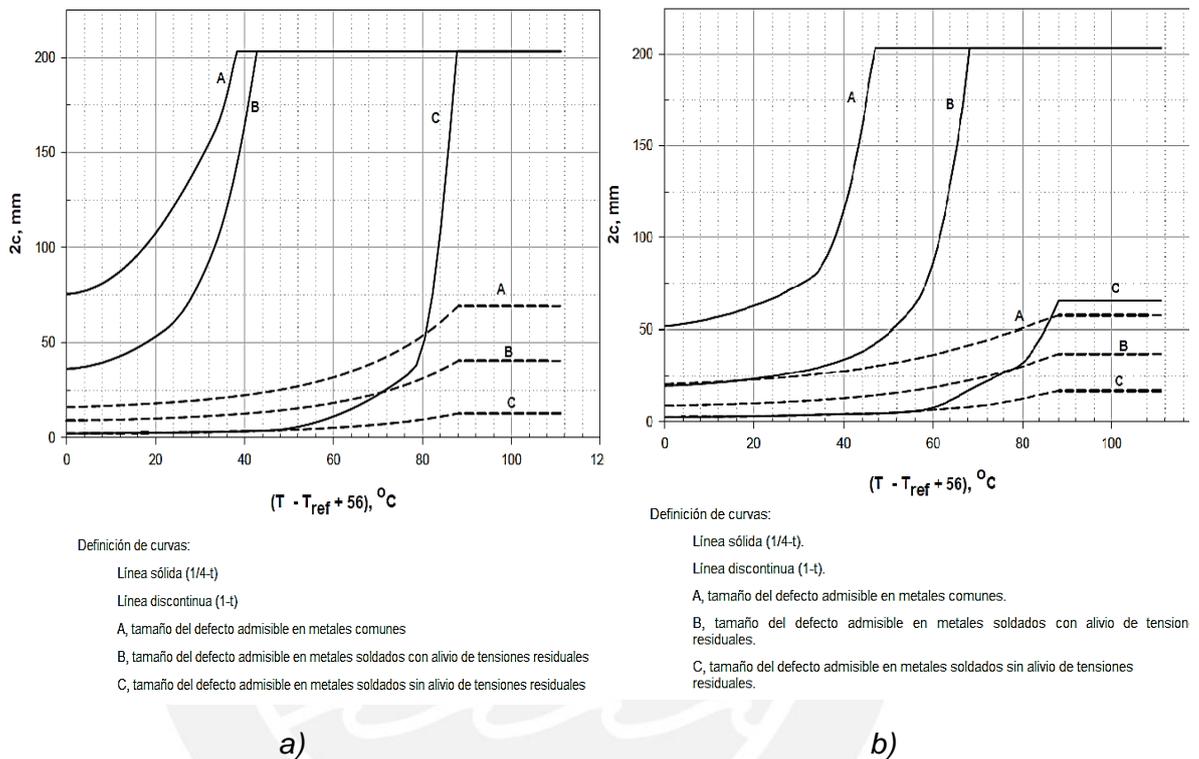


Figura 2.2 Gráfica (longitud de fisura máxima vs temperatura referencial)

cilindro - junta circunferencial – (a) fisura transversal (b) fisura longitudinal (Norma API 579)

Las de gráficas *cilindro-soldadura-fisura* están constituidas por curvas de proyección (A, B, C) que definen el tamaño admisible de la fisura bajo dos criterios: 1-t y 1/4-t, además las gráficas vinculan la temperatura referencial (eje de las abscisas) con la longitud admisible de la fisura (eje de las ordenadas). La aplicación de la gráfica es descrita en los pasos siguientes.

2.2.4. Paso 4. Selección de curvas (A, B y C)

Las gráficas *cilindro-soldadura-fisura* presentadas en el paso anterior poseen curvas de proyección A, B, C las cuales son seleccionadas de acuerdo según los siguientes criterios:

Curva A – tamaño de fisura admisible en ausencia de soldadura

Curva B – tamaño de fisura admisible en material soldado que ha recibido un tratamiento térmico pos soldadura.

Curva C – tamaño de fisura admisible en material soldado sin tratamiento térmico pos soldadura.

Si la fisura se encuentra ubicada en la soldadura o se encuentra dentro de una distancia dos veces el espesor nominal de tubería, medida desde la línea central de la soldadura, se debe emplear la curva B o C, de lo contrario se emplea las curvas A. Además, cada curva, a su vez, posee condiciones que dependen de la profundidad de la fisura a y el espesor de pared del componente t que determinan también la selección de las mismas.

La profundidad de la fisura obtenida mediante algún ensayo no destructivo END, se caracteriza por cualquiera de dos criterios: $1-t$ o $1/4-t$.

- Para un espesor de pared menor igual que 25 mm, $t \leq 25\text{mm}$ (1 in):
 - ✓ Si $a \leq t/4$, se selecciona la curva (A, B o C) empleando el criterio $1/4-t$.
 - ✓ Si $a \geq t/4$, se selecciona la curva (A, B o C) empleando el criterio $1-t$.
- Para un espesor de pared menor igual a 38 mm, $25 < t \leq 38\text{mm}$ (1.5 in):
 - ✓ Si $a \leq 6\text{mm}$, se selecciona la curva (A, B o C) empleando el criterio $1/4-t$.
 - ✓ Si $a > 6\text{mm}$, se selecciona la curva (A, B o C) empleando el criterio $1-t$.

Si la profundidad de la fisura no es posible obtenerla por algún END, entonces se selecciona la curva (A, B o C) emplea el criterio $1-t$.

2.2.5. Paso 5. Determinación de la temperatura de referencia

La determinación de la temperatura de referencia T_{ref} marca el comportamiento frágil o dúctil del material; cuya selección se basa en las especificaciones del material, siendo el límite elástico una de las principales variables. La Tabla 2.1 clasifica los materiales en cuatro grupos (A, B, C y D) en función a las propiedades y tratamientos, y dicha clasificación se vincula al esfuerzo de fluencia mínimo especificado.

Tabla 2.1 Asignación de materiales para determinar la temperatura de referencia

Grupo	Material
A	<ol style="list-style-type: none"> All carbon and all low alloy steel plates, structural shapes and bars not listed in Curves B, C, and D below. SA-216 Grades WCB and WCC if normalized and tempered or water-quenched and tempered; SA -217 Grade WC6 if normalized and tempered or water-quenched and tempered The following specifications for obsolete materials: A7, A10, A30, A70, A113, A149, A150 (3). The following specifications for obsolete materials from the 1934 edition of the ASME Code, Section VIII: S1, S2, S25, S26, and S27 (4). A201 and A212 unless it can be established that the steel was produced by a fine-grain practice (5)
B	<ol style="list-style-type: none"> SA-216 Grades WCA if normalized and tempered or water-quenched and tempered SA-216 Grades WCB and WCC for thicknesses not exceeding 2 inches if produced to a fine grain practice and water-quenched and tempered SA -217 Grade WC9 if normalized and tempered SA-285 Grades A and B SA-414 Grade A SA-442 Grade 55 > 1 in. if not to fine grain practice and normalized SA-442 Grade 60 if not to fine grain practice and normalized SA-515 Grades 55 and 60 SA-516 Grades 65 and 70 if not normalized SA-612 if not normalized SA-662 Grade B if not normalized Except for cast steels, all materials of Curve A if produced to fine grain practice and normalized which are not listed for Curve C and D below; All pipe, fittings, forgings, and tubing not listed for Curves C and D below; Parts permitted from paragraph UG-11 of the ASME Code, Section VIII, Division 1, shall be included in Curve B even when fabricated from plate that otherwise would be assigned to a different curve. A201 and A212 if it can be established that the steel was produced by a fine-grain practice.
C	<ol style="list-style-type: none"> SA-182 Grades 21 and 22 if normalized and tempered. SA-302 Grades C and D SA-336 Grades F21 and F22 if normalized and tempered SA-387 Grades 21 and 22 if normalized and tempered SA-442 Grades 55 < 1 in. if not to fine grain practice and normalized SA-516 Grades 55 and 60 if not normalized SA-533 Grades B and C SA-662 Grade A All material of Curve B if produced to fine grain practice and normalized and not listed for Curve D below
D	<p>SA-203 SA-442 if to fine grain practice and normalized SA-508 Class 1 SA-516 if normalized SA-524 Classes 1 and 2 SA-537 Classes 1 and 2 SA-612 if normalized SA-662 if normalized SA-738 Grade A</p>

La Tabla 2.2 proporciona el valor de temperatura de referencia usado para una evaluación nivel 1, empleando el esfuerzo de fluencia del material y la clasificación que se obtuvo de la tabla anterior.

Tabla 2.2 Temperatura de referencia para nivel 1

Carbon Steels – 20 Joule or 15 ft-lb Transition Temperature for Each ASME Exemption Curve				
MYS (MPa)	ASME Exemption Curve			
	A (°C)	B (°C)	C (°C)	D (°C)
200	42	21	0	-15
210	38	17	-4	-18
220	36	15	-7	-21
230	33	12	-9	-23
240	31	10	-11	-26
260	27	6	-15	-29
280	24	3	-18	-32
300	22	1	-21	-35
320	19	-2	-23	-37
340	17	-4	-25	-39
360	15	-6	-27	-41

Low Alloy Steels – 27 Joule or 20 ft-lb Transition Temperature for Each ASME Exemption Curve				
MYS (MPa)	ASME Exemption Curve			
	A (°C)	B (°C)	C (°C)	D (°C)
200	55	33	12	-2
210	50	29	8	-7
220	46	25	4	-11
230	43	22	1	-14
240	40	19	-2	-16
250	38	17	-4	-19
260	36	15	-6	-21
270	34	13	-8	-23
280	32	11	-10	-24
290	31	10	-11	-26
300	30	8	-13	-27
310	28	7	-14	-28
320	27	6	-15	-30
330	26	5	-16	-31
340	25	4	-17	-32
360	23	2	-19	-34
380	21	0	-21	-36
400	19	-2	-23	-37
420	18	-3	-24	-39
440	16	-5	-26	-40
460	15	-6	-27	-42
480	14	-7	-28	-43
500	13	-8	-29	-44
520	12	-9	-30	-45
540	11	-10	-31	-46
560	10	-11	-32	-47

Note: MYS minimum specified yield strength of the material.

2.2.6. Paso 6. Determinación de la longitud de fisura máxima permisible

La determinación de la longitud de fisura máxima permisible se basa en los pasos anteriores: identificación de las condiciones de operación, caracterización de la fisura, selección de gráficas cilindro-soldadura-fisura, selección de curvas (A, B y C) y determinación de la temperatura de referencia.

Para determinar la longitud máxima de la fisura se debe de hallar el valor de la siguiente expresión.

$$T - T_{ref} + 56^{\circ}C \quad (2.1)$$

Con el valor obtenido de la expresión 2.1, se ingresa en la gráfica seleccionada en el paso 3 (eje de las abscisas) y se interseca con la curva A, B o C seleccionada en el paso 4. De esta forma se toma el valor del eje de las ordenadas de la gráfica y se obtiene el valor de longitud permisible $2c_{max}$, como se puede apreciar en la Figura 2.3.

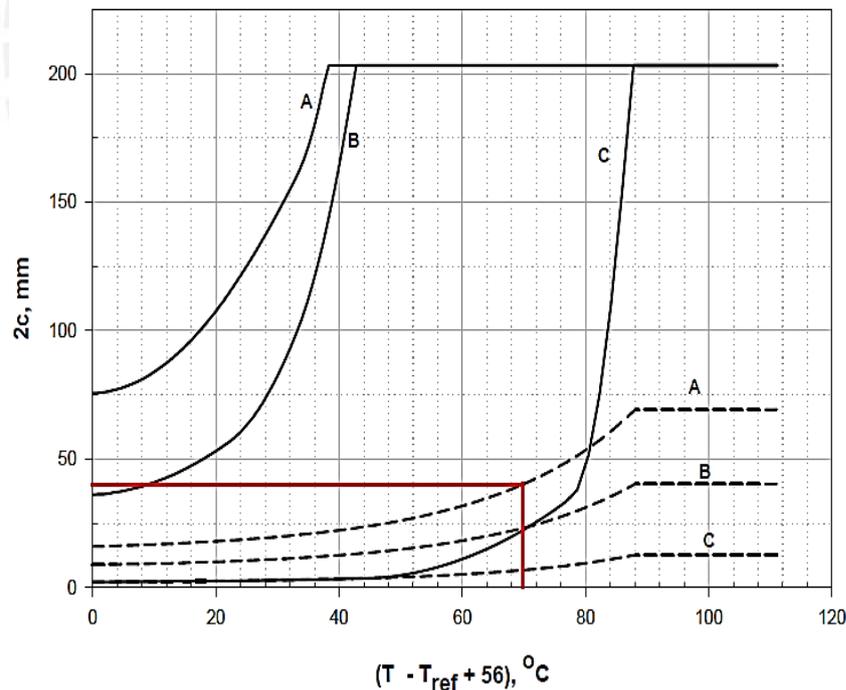


Figura 2.3. Determinación de la longitud de fisura máxima permisible

2.2.7. Paso 7. Evaluación

Para tener la certeza que un componente evaluado, en este nivel, es apto para el funcionamiento, se establece el siguiente criterio: Si la longitud de fisura máxima

permisible es mayor o igual a la longitud de fisura del componente evaluado, dicho componente aún se encuentra en condiciones de seguir en servicio; de lo contrario el estudio puede ser mejorado mediante una más rigurosa caracterización de la fisura.

$$2c_{maz} \geq 2c \rightarrow \text{Componente apto}$$

2.3. Procedimiento de evaluación nivel 2

Al igual que en el procedimiento de evaluación nivel 1, se establece como primer paso la determinación de las condiciones a las cuales el componente se encuentra operando; siendo en el caso de una tubería: presión, combinación de cargas y temperatura de trabajo

2.3.1. Paso 1. Identificación de las condiciones de operación

Al igual que en el procedimiento de evaluación nivel 1, se establece como primer paso la determinación de las condiciones a las cuales el componente se encuentra operando; siendo en el caso de una tubería: presión, combinación de cargas y temperatura de trabajo.

2.3.2. Paso 2. Caracterización de la carga

Consiste en determinar la distribución de esfuerzos a la cual está sometido el componente y clasificar la carga en cualquiera de las tres categorías:

- Esfuerzos primarios: Distribución de esfuerzos desarrollados por la imposición de cargas controladas.
- Esfuerzos secundarios: Distribución de esfuerzos desarrollados por restricciones de partes adyacentes o por restricciones del propio componente.
- Esfuerzos residuales: Si la fisura está localizada en un campo de tensiones residuales.

2.3.3. Paso 3. Determinación de las propiedades del material

Las propiedades mecánicas del material requeridas para el estudio, son las siguientes:

- Esfuerzo de fluencia del material, σ_{ys}
- Esfuerzo de rotura del material, σ_r
- La tenacidad a la fractura del material, K_{mat}

2.3.4. Paso 4. Caracterización de la fisura

De la misma manera que en procedimiento de evaluación nivel 1, se requiere determinar el tipo y parámetros geométricos de la fisura. El procedimiento ha sido implementado para el tratamiento de una fisura semi elíptica superficial en dirección transversal (Fig. 2.1 a) y longitudinal (Fig. 2.1 b) con longitud $2c$ y profundidad a .

2.3.5. Paso 5. Determinación de esfuerzos

La determinación de los esfuerzos depende de las cargas a las cuales está sometido el componente y la geometría del mismo. Los esfuerzos determinados son los de **membrana y flexión**, los cuales representan la linealización de la distribución del esfuerzo a través del espesor de pared del componente evaluado.

De acuerdo a la Figura 2.4, la cual ilustra la linealización de una distribución de esfuerzos, las expresiones generales de los esfuerzos de membrana y de flexión son definidas a continuación.

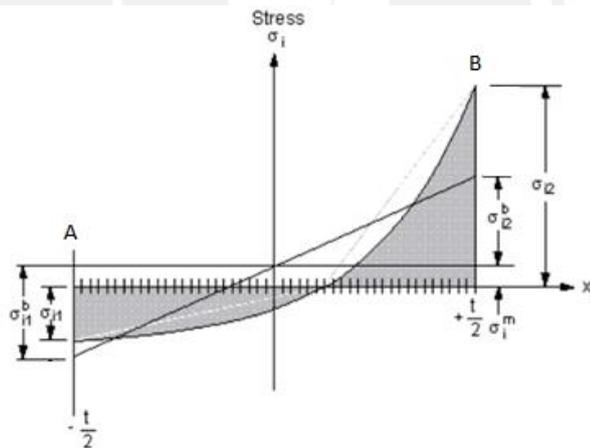


Figura 2.4. Linealización en esfuerzo de membrana y flexión.

El esfuerzo de membrana σ_i^m es expresado mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_i^m = \frac{1}{t} \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_i dx_s \tag{2.3}$$

Donde (ver Figura 2.4):

t : Espesor de pared del componente.

σ_i : Distribución de esfuerzo real a lo largo del espesor de pared del componente.

x_s : representa la coordenada a lo largo del espesor de pared.

Por otro lado, el esfuerzo de flexión σ_{i1}^b es definido mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_{i1}^b = \frac{1}{t} \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_i x_s dx_s \qquad \sigma_{i2}^b = -\sigma_{i1}^b \qquad (2.4)$$

Donde (ver Figura 2.4):

σ_{i1}^b : Esfuerzo de flexión en el extremo izquierdo - Punto A.

σ_{i2}^b : Esfuerzo de flexión en el extremo derecho - Punto B.

2.3.6. Paso 6. Selección de factores parciales de seguridad *PSF*

El procedimiento de evaluación establece la selección de factores parciales de seguridad *PSF* establecidos en la Tabla 2.3. La selección de los factores depende de las siguientes variables:

- Profundidad de la fisura, a
- Esfuerzo de fluencia del material, σ_{ys}
- Tenacidad a la fractura del material, K_{mat}
- Probabilidad de falla, p_f
- Índice de seguridad, β
- Coeficiente de variación, COV_s

COV es el coeficiente de variación usado para definir la incertidumbre en la distribución de esfuerzos primarias y tres categorías son proporcionadas.

Tabla 2.3. Factores parciales de seguridad *FSF* para la evaluación nivel 2.

Shallow Cracks: $a < 5 \text{ mm}$ (0.2 inches) (1)								
Probability Of Failure Category (2)	COV_s (3)	R_c (4)	$R_{kv} \leq R_c$ (5),(6)			$R_{kv} > R_c$ (5),(6)		
			PSF_s	PSF_k	PSF_a	PSF_s	PSF_k	PSF_a
$p_f = 2.3(10^{-2})$ ($\beta = 2.0$)	0.10	1.0	1.20	1.43	1.08	1.25	1.0	1.0
	0.20	1.0	1.30	1.43	1.08	1.50	1.0	1.0
	0.30	1.0	1.55	1.43	1.08	1.75	1.0	1.0
$p_f = 10^{-3}$ ($\beta = 3.09$)	0.10	1.4	1.40	1.43	1.20	1.50	1.0	1.0
	0.20	1.4	1.50	1.82	1.10	2.0	1.0	1.0
	0.30	1.4	2.00	2.0	1.05	2.50	1.0	1.0
$p_f = 10^{-6}$ ($\beta = 4.75$)	0.10	2.0	1.75	2.0	1.35	2.00	1.0	1.0
	0.20	2.0	2.50	2.0	1.50	3.10	1.0	1.0
	0.30	2.0	2.6	2.0	1.50	4.10	1.0	1.0

Deep Cracks: $a \geq 5 \text{ mm}$ (0.2 inches) (1)								
Probability Of Failure Category (2)	COV_s (3)	R_c (4)	$R_{ky} \leq R_c$ (5),(6)			$R_{ky} > R_c$ (5),(6)		
			PSF_s	PSF_k	PSF_a	PSF_s	PSF_k	PSF_a
$p_f = 2.3(10^{-2})$ ($\beta = 2.0$)	0.10	1.8	1.20	1.33	1.10	1.25	1.0	1.0
	0.20	1.3	1.40	1.54	1.10	1.50	1.0	1.0
	0.30	1.1	1.60	1.67	1.10	1.75	1.0	1.0
$p_f = 10^{-3}$ ($\beta = 3.09$)	0.10	1.9	1.40	1.67	1.15	1.50	1.0	1.0
	0.20	1.5	1.80	1.43	1.10	2.0	1.0	1.0
	0.30	1.3	2.30	1.43	1.10	2.50	1.0	1.0
$p_f = 10^{-6}$ ($\beta = 4.75$)	0.10	1.8	1.70	2.0	1.25	2.00	1.0	1.0
	0.20	1.5	2.60	1.82	1.25	3.10	1.0	1.0
	0.30	1.5	3.50	1.67	1.25	4.10	1.0	1.0

- $COV_s = 0.1$, si las cargas principales y los correspondientes esfuerzos primarios en la región de falla son calculados y sus valores son confiables.
- $COV_s = 0.2$, si las cargas principales y los correspondientes esfuerzos primarios en la región de falla son calculados y sus valores son razonablemente confiables. La incertidumbre en los esfuerzos primarios se debe a las posibles variaciones en las cargas aplicadas o estimaciones del modelo de análisis de esfuerzos.
- $COV_s = 0.3$, si las estimaciones de los esfuerzos primarios son considerablemente inciertos. La incertidumbre en los esfuerzos primarios resultan de la naturaleza desconocida o aleatoria de la carga aplicada y/o estimaciones del modelo de análisis de esfuerzos.

La Tabla 2.3 cuenta con parámetros de relaciones a las propiedades del material como R_c y R_{Ky} . El parámetro R_c es un valor de corte usado para definir la región de colapso frágil/plástico y colapso plástico, y la correspondiente categoría de PSF . Por otro lado, R_{Ky} definido por la expresión 2.5, es empleado en conjunto con R_c para la determinación de los PSF .

$$R_{ky} = \frac{K_{mat}^{mean}}{\sigma_{ys}} C_u \quad (2.5)$$

Donde:

K_{mat}^{mean} : Valor promedio de la tenacidad a la fractura del material

C_u : Factor de conversión igual a 1 si se emplea unidades inglesas $ksi\sqrt{in}$ y 6.275 si se emplea unidades métricas $MPa\sqrt{m}$.

Cabe señalar que la metodología que envuelve a los factores parciales de seguridad es conocimiento proporcionado por Wirsching, P.H. and Mansour, A.E. [11].

2.3.7. Paso 7. Afectación de esfuerzos, propiedades del material y tamaño de fisura

Los esfuerzos, el material del componente y el tamaño de la fisura son castigados por los PSF de la siguiente manera:

- *Esfuerzos de membrana y de flexión.* Los esfuerzos de membrana y de flexión determinados en el paso 5 son afectados por el empleo de los factores de seguridad PSF_s , como se muestra a continuación.

$$P_m = \sigma^m \cdot PSF_s \quad (2.6)$$

$$P_b = \sigma^b \cdot PSF_s \quad (2.7)$$

- *Tenacidad a la fractura del material.* La tenacidad a la fractura del componente es castigada empleando el valor del factor de seguridad PSF_k como se aprecia en la siguiente expresión:

$$K'_{mat} = \frac{K_{mat}}{PSF_k} \quad (2.8)$$

- *Tamaño de fisura.* Para una fisura superficial, la profundidad a es afectada por PSF_a de la siguiente manera:

$$a' = a \cdot PSF_a \quad (2.9)$$

2.3.8. Paso 8. Determinación del esfuerzo de referencia

El esfuerzo de referencia es obtenido en base a los esfuerzos y a la profundidad de fisura alterados por los PSF en el anterior paso. Se entiende que el esfuerzo de referencia es una combinación de los esfuerzos de membrana y flexión que contempla

a través de una expresión analítica la presencia de la fisura en un determinado componente.

Los esfuerzos de referencia requeridos para los procedimientos de evaluación nivel 2 y 3, según lo señala la norma, pueden ser obtenidos de soluciones de handbook o mediante análisis por elementos finitos. Cabe señalar que el siguiente capítulo del presente trabajo desarrolla modelos computacionales que determinan el esfuerzo de referencia como lo contempla la norma.

A continuación se presentan expresiones del esfuerzo de referencia, proporcionadas por la norma, que permiten el estudio de un componente cilíndrico afectado por fisuras superficiales semi elíptica externas.

La expresión 2.10 permite determinar el esfuerzo de referencia de un componente cilíndrico con una fisura semi elíptica transversal.

$$\sigma_{ref} = \frac{P_b + (P_b^2 + 9\{Z \cdot P_m \cdot (1 - \alpha)^2\}^2)^{0.5}}{3(1 - \alpha)^2} \quad (2.10)$$

Donde α y Z son coeficientes de forma definidos por las expresiones 2.11 y 2.12.

$$\alpha = \frac{\frac{a'}{t}}{1 + \frac{t}{c'}} \quad (2.11)$$

$$Z = \left[\frac{2\psi}{\pi} - \frac{x\theta}{\pi} \left(\frac{2 - 2\tau + x\tau}{2 - \tau} \right) \right]^{-1} \quad (2.12)$$

Donde las variables ψ , x , θ , τ están definidas por las siguientes expresiones:

$$\psi = \arccos(Asen\theta) \quad (2.13)$$

$$A = x \left[\frac{(1 - \tau)(2 - 2\tau + x\tau) + (1 - \tau + x\tau)^2}{2\{1 + (2 - \tau)(1 - \tau)\}} \right] \quad (2.14)$$

$$x = \frac{a'}{t} \quad (2.15)$$

$$\theta = \frac{\pi c'}{4R_o} \quad (2.16)$$

$$\tau = \frac{t}{R_o} \quad (2.17)$$

Donde R_o representa el radio exterior de la tubería evaluada.

Por otro lado, la expresión 2.18 permite determinar el esfuerzo de referencia de un componente cilíndrico con una fisura semi elíptica longitudinal.

$$\sigma_{ref} = \frac{gP_b + [(gP_b)^2 + 9(M_s \cdot P_m \cdot (1 - \alpha)^2)^2]^{0.5}}{3(1 - \alpha)^2} \quad (2.18)$$

Donde g , α y M_s son coeficientes de forma definidos por las expresiones 2.19, 2.20 y 2.21.

$$g = 1 - 20 \left(\frac{a'}{2c'} \right)^{0.75} \alpha^3 \quad (2.19)$$

$$\alpha = \frac{\frac{a'}{t}}{1 + \frac{t}{c'}} \quad (2.20)$$

$$M_s = \frac{1}{1 - \frac{a'}{t} + \frac{a'}{t} \left(\frac{1}{M_t \lambda_a} \right)} \quad (2.21)$$

Donde las variables M_t y λ_a están definidas por las siguientes expresiones:

$$M_t = \left(\frac{1.02 + 0.4411\lambda^2 + 0.006124\lambda^4}{1.0 + 0.02642\lambda^2 + 1.533(10^{-6})\lambda^4} \right)^{0.5} \quad (2.22)$$

$$\lambda_a = \frac{1.818 c'}{\sqrt{R_i a'}} \quad (2.23)$$

Donde R_i representa el radio interior de la tubería evaluada.

2.3.9. Paso 9. Determinación del factor de intensidad de tensiones

Un parámetro importante en la evaluación de un componente fisurado es el factor de intensidad de tensiones K , el cual caracteriza la intensidad de los esfuerzos alrededor del frente de propagación de la grieta. La propiedad más resaltante que posee K es su independencia frente al material del componente evaluado, ya está definido por la geometría del componente, el tamaño de la grieta y la carga aplicada; bajo condiciones de comportamiento elástico-lineal del material del componente evaluado.

La norma proporciona un compendio de expresiones analíticas ciertas configuraciones geométricas que permiten determinar K , sin embargo, también señala que la distribución de esfuerzos a las que está sometido el componente y el factor de intensidad de tensiones K pueden ser estimados por métodos numéricos como los elementos finitos. Por ello, el capítulo tres del presente trabajo describe el desarrollo

de modelos computacionales que permiten determinar los esfuerzos del componente y caracterizar el frente de la fisura.

- *Tubería con fisura superficial externa semi elíptica en dirección transversal.*

La expresión 2.24 permite determinar K de un componente cilíndrico con una fisura superficial externa semi elíptica en dirección transversal.

$$K_I = G_0 \left(\frac{pR_i^2}{R_0^2 - R_i^2} + \frac{F}{\pi(R_0^2 - R_i^2)} \right) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (2.24)$$

Donde p y F son presión interna y fuerza axial a la cual está sometido el componente, respectivamente. Q es una variable dimensional definida por la siguiente expresión:

$$Q = 1 + 1.464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1.65} \quad \frac{a}{c} \leq 1 \quad (2.25)$$

$$Q = 1 + 1.464 \left(\frac{c}{a} \right)^{1.65} \quad \frac{a}{c} > 1 \quad (2.26)$$

El coeficiente G_0 es definido por la siguiente expresión:

$$G_0 = A_{0,0} + A_{1,0}\beta + A_{2,0}\beta^2 + A_{3,0}\beta^3 + A_{4,0}\beta^4 + A_{5,0}\beta^5 + A_{6,0}\beta^6 \quad (2.27)$$

Donde β es una variable proporcionada por la expresión 2.28 y los parámetros A_{i0} son proporcionados por tablas contenidas en el anexo C de la norma.

$$\beta = (2\varphi)/\pi \quad (2.28)$$

φ es el ángulo de la elipse que evalúa el punto más profundo de la fisura semi elíptica cuando es igual a $\pi/2$ y los puntos de propagación superficial cuando es igual a cero.

- *Tubería con fisura superficial externa semi elíptica en dirección longitudinal.*

La expresión analítica 2.24 permite determinar K de un componente cilíndrico con una fisura superficial externa semi elíptica en dirección longitudinal.

$$K_I = \frac{pR_i^2}{R_0^2 - R_i^2} \left[2G_0 - 2G_1 \left(\frac{a}{R_0} \right) + 3G_2 \left(\frac{a}{R_0} \right)^2 - 4G_3 \left(\frac{a}{R_0} \right)^3 + 5G_4 \left(\frac{a}{R_0} \right)^4 \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (2.29)$$

Donde Q , G_0 y β ya fueron definidos por las expresiones 2.25 a 2.28. Por otro lado, G_1 es un coeficiente definido por la expresión 2.30.

$$G_1 = A_{0,1} + A_{1,1}\beta + A_{2,1}\beta^2 + A_{3,1}\beta^3 + A_{4,1}\beta^4 + A_{5,1}\beta^5 + A_{6,1}\beta^6 \quad (2.30)$$

Los parámetros A_{i1} son proporcionados por tablas contenidas en el anexo C de la norma.

Para el punto más profundo de la fisura semi eliptica, cuando $\varphi = \pi/2$, los coeficientes influyentes son iguales a:

$$G_2 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left(\frac{16}{15} + \frac{1}{3}M_1 + \frac{16}{105}M_2 + \frac{1}{12}M_3 \right) \quad (2.31)$$

$$G_3 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left(\frac{32}{35} + \frac{1}{4}M_1 + \frac{32}{315}M_2 + \frac{1}{20}M_3 \right) \quad (2.32)$$

$$G_4 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left(\frac{256}{315} + \frac{1}{5}M_1 + \frac{256}{3465}M_2 + \frac{1}{30}M_3 \right) \quad (2.33)$$

Para el punto superficial de la fisura, cuando $\varphi = 0$, los coeficientes influyentes son iguales a:

$$G_2 = \frac{\sqrt{Q}}{\pi} \left(\frac{4}{5} + \frac{2}{3}N_1 + \frac{4}{7}N_2 + \frac{1}{2}N_3 \right) \quad (2.34)$$

$$G_3 = \frac{\sqrt{Q}}{\pi} \left(\frac{4}{7} + \frac{1}{2}N_1 + \frac{4}{9}N_2 + \frac{2}{5}N_3 \right) \quad (2.35)$$

$$G_4 = \frac{\sqrt{Q}}{\pi} \left(\frac{4}{9} + \frac{2}{5}N_1 + \frac{4}{11}N_2 + \frac{1}{3}N_3 \right) \quad (2.36)$$

Donde:

$$M_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2Q}}(3G_1 - G_0) - \frac{24}{5} \quad (2.37)$$

$$M_2 = 3 \quad (2.38)$$

$$M_3 = \frac{6\pi}{\sqrt{2Q}}(G_0 - 2G_1) + \frac{8}{5} \quad (2.39)$$

$$N_1 = \frac{3\pi}{\sqrt{Q}}(2G_0 - 5G_1) - 8 \quad (2.40)$$

$$N_2 = \frac{15\pi}{\sqrt{Q}}(3G_1 - G_0) + 15 \quad (2.41)$$

$$N_3 = \frac{3\pi}{\sqrt{Q}}(3G_0 - 10G_1) - 8 \quad (2.42)$$

Cabe señalar que las expresiones planteadas son validas si la geometria de la fisura y tuberia se encuentran dentro de los siguientes limites:

$$0 \leq a/t \leq 0.8$$

$$0.5 \leq c/a \leq 32.0$$

$$0 \leq \varphi \leq \pi$$

$$1.0 \leq R_i/t \leq \infty$$

2.3.10. Paso 10. Determinación del factor de carga y de tenacidad

El factor de carga es la relación entre el esfuerzo de referencia y el esfuerzo de fluencia del material descrita a continuación.

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_{ys}} \quad (2.43)$$

El factor de tenacidad es la relación entre el factor de intensidad de tensiones productos de los esfuerzos primarios, secundarios y residuales; y la tenacidad a la fractura del material, como se puede apreciar en la siguiente expresión.

$$K_r = \frac{(K_I^P + \phi K_I^{SR})}{K_{mat}} \quad (2.44)$$

Donde:

K_I^P : Factor de intensidad de tensiones debido a las cargas primarias

K_I^{SR} : Factor de intensidad de tensiones debido a las cargas secundarias y residuales

ϕ : Factor de corrección por plasticidad

2.3.11. Paso 11. Determinación de la gráfica FAD

Los procedimientos de evaluación de la norma están basados en la aplicación del Diagrama de Evaluación de Fallo (*Failure Assessment Diagram, FAD*), dicho diagrama representa un análisis grafico integrado en el que se evalúan de forma simultánea la fractura y el colapso plástico, como se puede apreciar en la Figura 2.5. El diagrama FAD está definido por una curva cuyo comportamiento es descrito por la ecuación 2.45.

$$K_r = [1 - 0.14(L_r)^2]\{0.3 + 0.7 \exp[-0.65(L_r)^6]\} \quad (2.45)$$

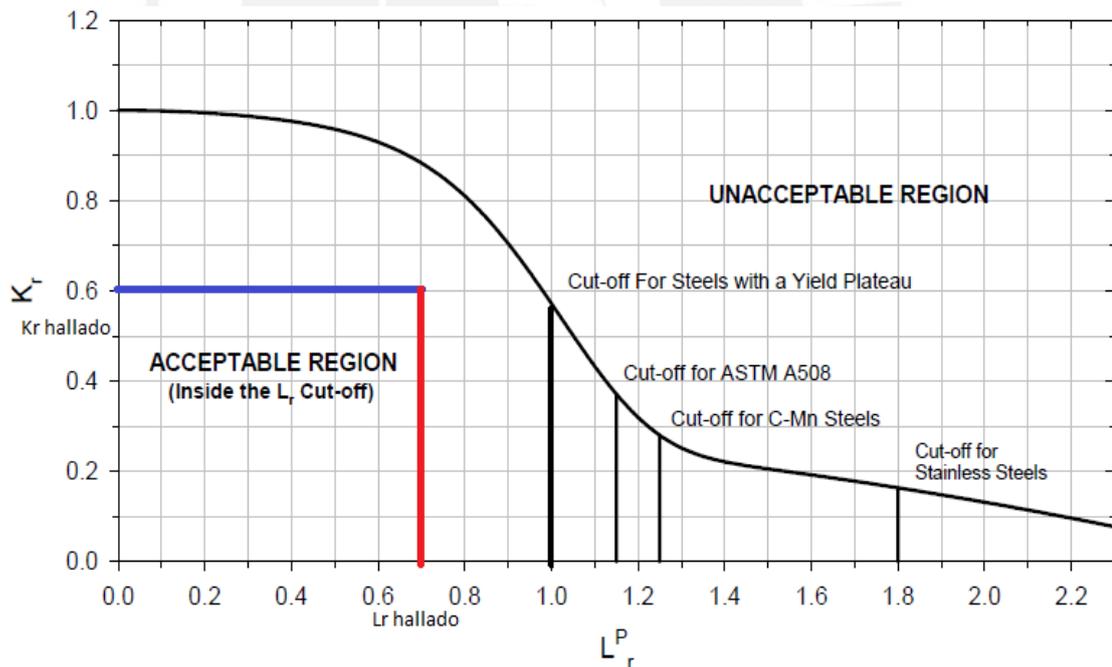
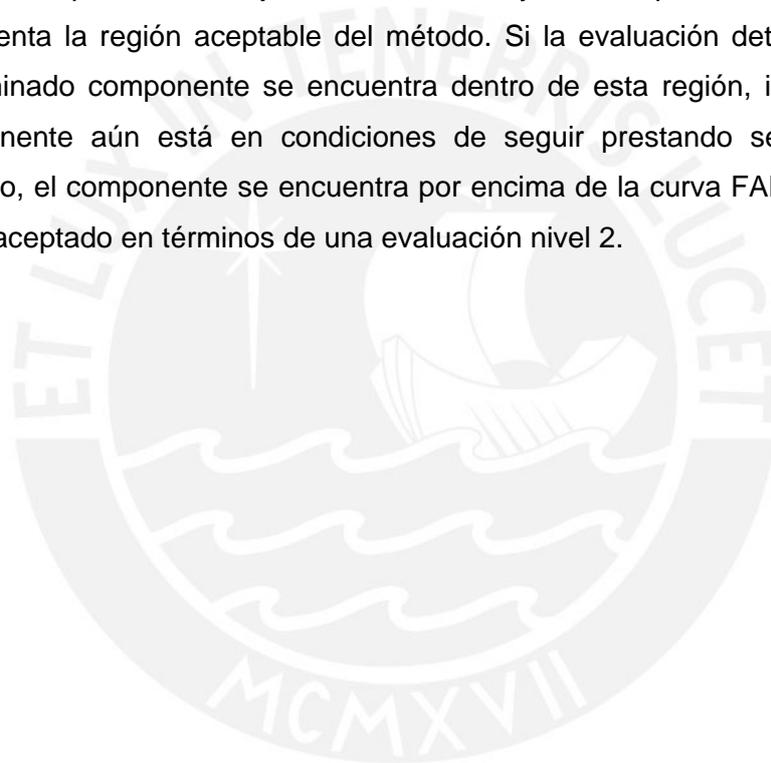


Figura 2.5. Diagrama de Evaluación de Fallo (*Failure Assessment Diagram, FAD*)

2.3.12. Paso 12. Evaluación

La evaluación se realiza de la siguiente manera (ver Figura 2.5):

- Se procede a trazar una recta vertical paralela al eje de las ordenadas, a partir del valor de factor de carga L_r , determinado en el paso 10.
- Se procede a trazar una recta horizontal paralela al eje de abscisas a partir del valor del factor de tenacidad K_r , determinado en el paso 10.
- La intersección de ambas rectas determina el estado del componente evaluado.
- El área comprendida debajo de la curva FAD y limitado por el valor de corte $L_r=1$, representa la región aceptable del método. Si la evaluación determinada que un determinado componente se encuentra dentro de esta región, implica que dicho componente aún está en condiciones de seguir prestando servicio. Si por el contrario, el componente se encuentra por encima de la curva FAD, el componente no es aceptado en términos de una evaluación nivel 2.



CAPÍTULO 3

SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE TUBERÍAS FISURADAS

El presente capítulo describe el desarrollo de modelos computacionales que permiten determinar variables esenciales que forman parte del procedimiento de evaluación de tuberías con fisuras superficiales semi elípticas implementado en el capítulo anterior.

La norma propone expresiones analíticas para determinar esfuerzos en el componente, sin embargo reconoce la posibilidad de determinarlos mediante simulación numérica por el método de los elementos finitos.

Cabe mencionar que existe ciertas limitaciones para determinar el factor de intensidad de tensiones K mediante expresiones analíticas proporcionadas por la norma, ya que requieren de una serie de coeficientes que dependen de tablas diseñadas solo para ciertas relaciones geométricas. Por ello, la posibilidad de disponer alternativas, como el método de elementos finitos, que permitan determinar K de forma precisa y ágil resulta una propuesta interesante.

Por otro lado, los resultados obtenidos mediante simulación son contrastados, en el capítulo 4, con los valores determinados analíticamente siguiendo los pasos del proceso de evaluación descrito en el capítulo anterior.

3.1. Alcance

El presente estudio pretende que mediante el desarrollo de modelos computacionales, a partir del dominio de una herramienta de software apropiada, es posible determinar parámetros esenciales para la evaluación de la integridad estructural de tuberías con fisuras de forma semi elípticas sobre superficies exteriores. Los parámetros esenciales que serán tratados son los siguientes:

- Esfuerzo de membrana, σ^m
- Esfuerzo de flexión, σ^b
- Esfuerzo de referencia, σ_{ref}
- Factor de intensidad de tensiones, K

Un procedimiento de simulación numérica mediante elementos finitos contempla etapas de pre procesamiento, análisis y pos procesamiento, como lo ilustra el esquema de la Figura 3.1. La etapa de pre procesamiento tiene por finalidad el desarrollo de modelos computacionales que permitirán determinar las variables esenciales mencionadas, y de esta forma complementar la evaluación de integridad de tuberías fisuradas.

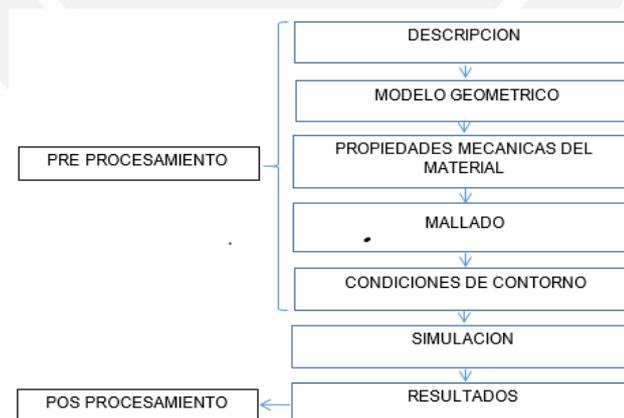


Figura 3.1. Procedimiento de evaluación mediante el MEF

3.2. Descripción

El estudio comprende el tratamiento de dos casos de configuración geométrica. Ambos casos tratan una tubería afectada por una fisura semi elíptica superficial externa, pero el primer caso aborda a la fisura orientada de dirección transversal y el

segundo a la fisura en dirección longitudinal, tal como se puede apreciar en la Figura 3.2.

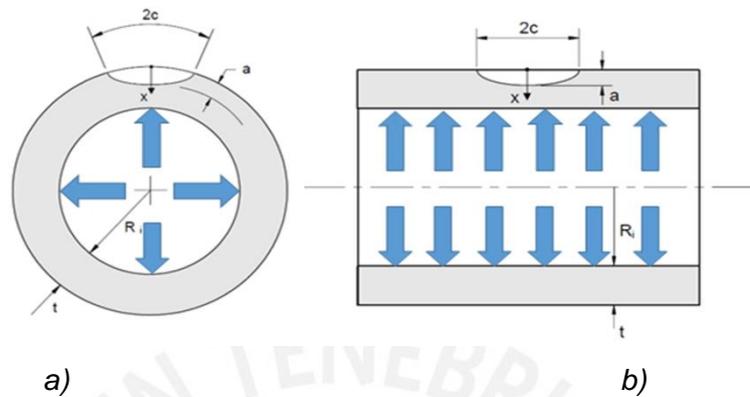


Figura 3.2. Tubería con fisura semi elíptica superficial exterior en dirección (a) transversal y (b) longitudinal.

3.3. Modelo geométrico

La modelación geométrica es el primer paso que se ejecuta durante el análisis mediante la simulación computacional en problemas estructurales. Como ya se mencionó, el modelo geométrico corresponde a un cuerpo cilindro en el cual la fisura está localizada en la parte media y posee dos frentes propagación, sobre la superficie del componente y a través del espesor de pared. La Figura 3.3 ilustra vistas en sección de dos tuberías donde el punto A representa la propagación sobre la superficie ($\varphi = 0$) y el punto B, la propagación a través del espesor de pared ($\varphi = \pi/2$).

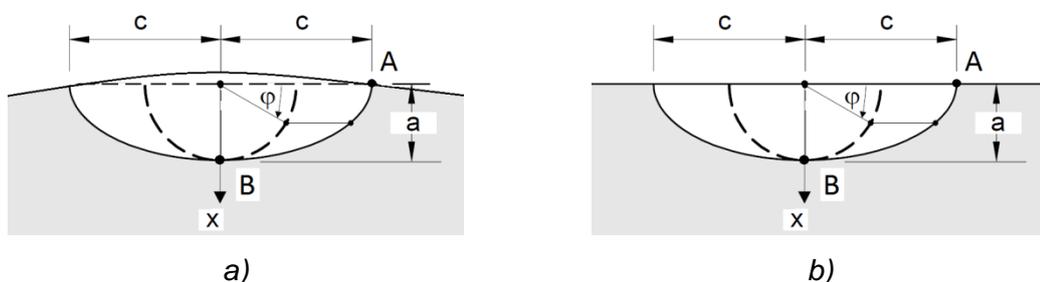


Figura 3.3. Fisura semi-elíptica con dos frentes de propagación con orientación (a) transversal y (b) longitudinal.

3.4. Propiedades del material

Las dos propiedades mecánicas del material de la tubería que son requeridas para un análisis estático del componente mediante simulación numérica por elementos finitos son dos: el módulo de elasticidad o Young y coeficiente de Poisson. Además se conoce que en la mayoría de los aceros, las propiedades mecánicas mencionadas son muy parecidas e iguales a 0.21×10^{12} N/m² y 0.28, respectivamente.

3.5. Discretización del modelo

Para el mallado o discretización de la tubería se utilizan elementos 3D tetraédricos, tal como se puede apreciar en las Figura 3.4.

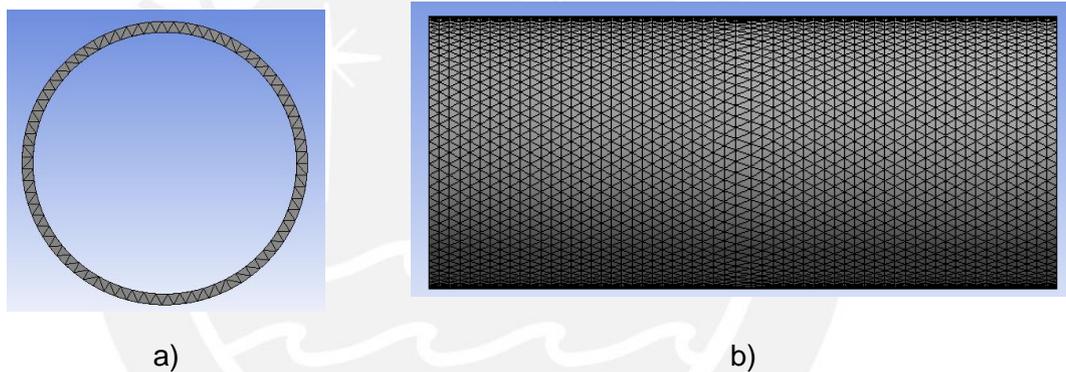


Figura 3.4. Discretización de la tubería - (a) vista transversal y (b) vista longitudinal

En la actualidad el método de los elementos finitos aplicado a la mecánica de fractura es una herramienta bastante utilizada y capaz de interpretar la singularidad en la cabeza de la fisura mediante elementos finitos especiales. Estos elementos de segundo orden logran interpretar la singularidad de la fisura desplazando los nodos intermedios de los lados hacia el vértice del elemento que representa la cabeza de la fisura, situándolos a un cuarto de la longitud del lado, como se puede apreciar en la Figura 3.5.

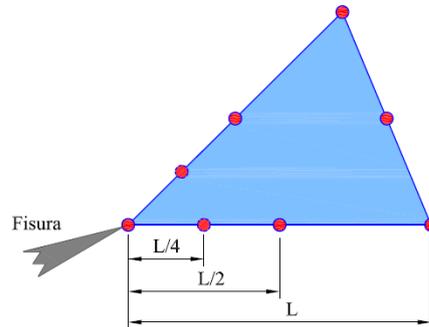


Figura 3.5. Distorsión nodal de elementos especiales de segundo orden.

Debido a la necesidad de obtener resultados precisos del frente de la fisura, se procede a imponer una malla más fina alrededor de la fisura como se puede apreciar en las Figuras 3.6 y 3.7.

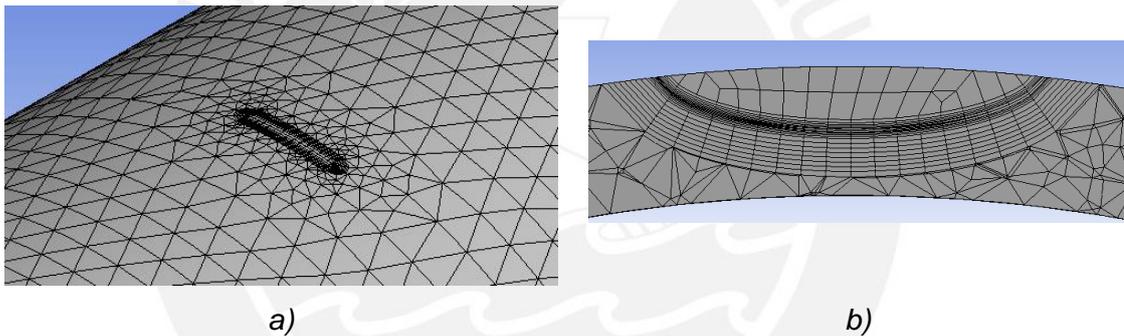


Figura 3.6. Discretización de la fisura transversal (a) vista isométrica (b) vista en sección.

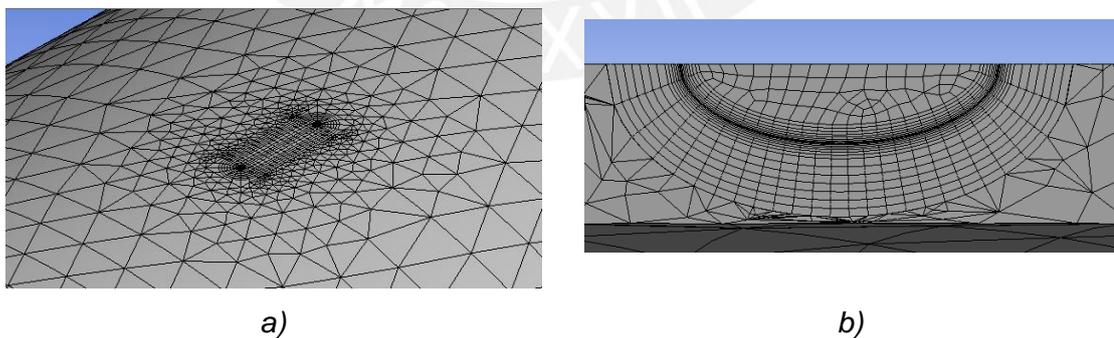


Figura 3.7. Discretización de la fisura longitudinal (a) vista isométrica (b) vista en sección.

3.6. Condiciones de contorno

3.6.1. Restricciones

La figura 3.8 muestra la aplicación de la restricción de desplazamiento a lo largo del eje z sobre la cara transversal de uno de los extremos del modelo. El desplazamiento en las otras dos direcciones (plano XY) no son restringidas. Sobre el otro extremo, tal como se aprecia en la Figura 3.9, se impone una restricción tangencial a la arista circunferencial interna, dejando libre el desplazamiento axial y radial de la misma. La imposición de ambas restricciones garantiza la estabilidad del modelo durante la etapa del análisis.

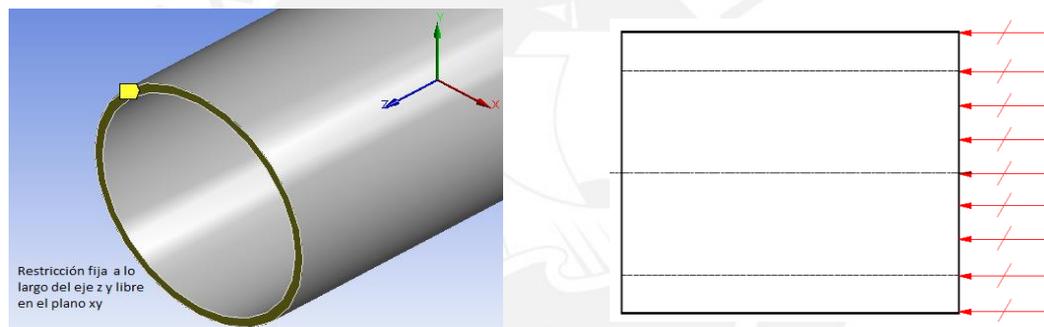


Figura 3.8. Aplicación de la restricción sobre la cara transversal de la tubería

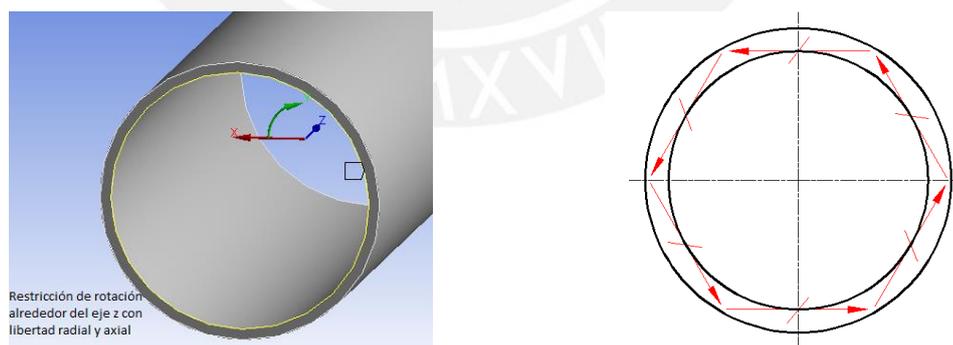


Figura 3.9. Aplicación de la restricción sobre la circunferencia interna

3.6.2. Aplicación de carga

La típica carga en tuberías es la presión interna (ver Figura 3.10), la cual genera esfuerzos tangenciales (circunferenciales) y longitudinales a lo largo del componente.



Figura 3.10. Modelo de tubería sometida a presión interna.

Los esfuerzos tangenciales se generan de forma automática con la imposición de la carga, mientras que los esfuerzos longitudinales requieren ser impuesto ya que el modelo desarrollado no posee tapas. Por ello, se aplica una presión perpendicular a la cara transversal libre de la tubería – ya que una de las caras tienen desplazamiento cero en la dirección axial –, tal que interprete de forma correcta los esfuerzos longitudinales sobre las paredes del modelo; como se aprecia en la Figura 3.11.

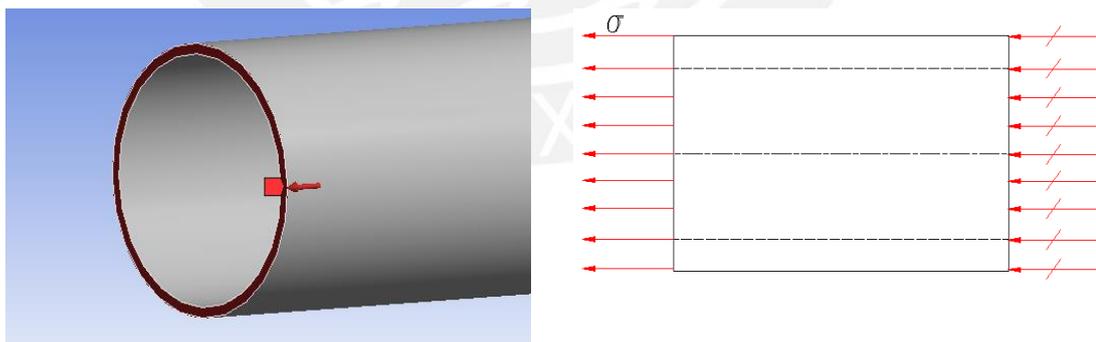


Figura 3.11. Aplicación de una carga axial que genere esfuerzos longitudinales.

CAPÍTULO 4

CASOS APLICATIVOS

El presente capítulo tiene por finalidad desarrollar los procedimientos de evaluación de la integridad estructural en el marco de la norma API579 complementados mediante simulación por elementos finitos para dos casos de estudio de tuberías fisuradas

El primer caso trata del estudio de una tubería de un reactor (vainas combustibles) afectada por fisuras superficiales semi elípticas. Las características geométricas, el material de la tubería y las condiciones de operación son obtenidos del trabajo realizado por Hector C. Sanzi [12], quien es un investigador del Grupo de Ingeniería Estructural de la Universidad Tecnológica Nacional F.R.H. de Argentina. Cabe resaltar que la evaluación realizada por este autor está basada en los procedimientos de evaluación nivel 2 descrito por la norma API 579.

El segundo estudio pretende abordar un caso real del medio local. Se toma la información de la primera falla ocurrida en la línea de transporte de líquido de gas natural LGN del proyecto de Camisea, la cual ocurrió el 22 de diciembre de 2004. La evaluación consiste en la aplicación del procedimiento de evaluación nivel 2 implementado en el capítulo 2 complementado con modelos computacionales

descritos en el capítulo 3, y determinar si la presencia de una fisura bajo cargas estáticas podría haber comprometido la integridad de la tubería

4.1. Evaluación de vainas combustibles

Hector C. Sanzi realiza un estudio donde describe un procedimiento normalizado para evaluar la integridad estructural de tubos (vainas combustibles) que poseen fisuras superficiales no pasante, aplicando técnicas computacionales por elementos finitos. Tomando la información del estudio realizado por dicho autor, se aplica los procesamientos de evaluación nivel 1 y 2 implementados en el capítulo 2 del presente trabajo.

4.1.1. Descripción del caso

Las vainas de combustión son tubos de material especial presentes en reactores y otros equipos, las cuales pueden presentar defectos durante su proceso de fabricación. Dichos defectos podrían convertirse en fisuras y se requiere descartar que éstas no afecten la integridad estructural del componente en el transcurso de su vida operativa.

La tabla 4.1 describe las características geométricas de los tubos evaluados y el material de dichos tubos es Zircaloy 4, cuyas propiedades mecánicas son descritas en la Tabla 4.2.

Diámetro interno D_i	Diámetro externo D_o	Espesor t
(mm)	(mm)	(mm)
12.1	13.1	0.5

Esfuerzo de fluencia	Esfuerzo de rotura	Tenacidad a la fractura
(N/mm^2)	(N/mm^2)	($MPa\sqrt{mm}$)
487	629	3478

Las condiciones de operación a las cuales están sometidas las vainas de combustión son descritas en la Tabla 4.3 y con la finalidad de evaluar la influencia de las fisuras

sobre el compoente, se toma en cuenta dos tipos de ellas: fisura superficial semi elíptica transversal y longitudinal. A continuación (Tabla 4.4) se detallan las características dimensionales de dichas fisuras.

Tabla 4. 3 Condiciones de operación

Presión interna	Temperatura
(MPa)	(°C)
12.459	27

Tabla 4. 4 Características dimensiones de las fisuras

	Transversal	Longitudinal
Profundidad (a) mm	0.25	0.25
Longitud ($2c$) mm	1.5	1

4.1.2. Procedimiento de evaluación nivel 1

4.1.2.1. Paso 1. Identificación de las condiciones de operación

Las condiciones de operación de la tubería se encuentran plasmadas en la Tabla 4.3.

4.1.2.2. Paso 2. Caracterización de la fisura

Las dimensiones geométricas de las fisuras transversal y longitudinal son descritas en la Tabla 4.4

4.1.2.3. Paso 3. Selección de gráficas Cilindro-Soldadura-Fisura

Las gráficas seleccionadas para el presente paso, son las siguientes:

- Cilindro - junta circunferencial - fisura transversal. (Figura 2.2 a)
- Cilindro - junta circunferencial - fisura longitudinal. (Figura 2.2 b)

Cabe resaltar que las vainas de combustión no presentan uniones soldadas, pero con la finalidad de seleccionar alguna de las gráficas proporcionadas por la norma, se considera la existencia de una unión circunferencial. Dicha suposición permite continuar con el procedimiento, siendo ésta corregida en el siguiente paso.

4.1.2.4. Paso 4. Selección de curvas (A, B y C)

Ya que las vainas de combustión no presentan unión soldada, se consideró una curva tipo A: *Curva A – tamaño de fisura admisible en ausencia de soldadura.*

Se considera que la profundidad de la fisura fue obtenida mediante END, y la selección del tipo de curva A se dio a través del siguiente criterio, descrito en el acápite 2.2.4:

- Para un espesor de pared menor igual que 25 mm, $t \leq 25\text{mm}$ (1 in):
 - ✓ Si $a \geq t/4$, se selecciona la curva (A, B o C) empleando el criterio 1- t .

El tubo posee un espesor de 0.5mm (Tabla 4.1) y la profundidad para ambos tipos de fisura, transversal y longitudinal, es igual a 0.25mm (Tabla 4.4), por lo tanto, se cumple que el espesor t es menor a 25mm y que la profundidad a es mayor a la cuarta parte del espesor. Entonces, se selecciona la curva A empleando el criterio 1- t .

4.1.2.5. Pas 5. Determinación de la temperatura de referencia

La determinación de la temperatura de referencia T_{ref} depende de la clasificación del material (A, B, C y D) proporcionada en la Tabla 2.1 y de su límite elástico σ_{ys} .

Cabe señalar que para el caso de estudio el material involucrado es una aleación no ferrosa, siendo designado como un material SB por ASME Boiler and Pressure Vesel Code; debido a que los grupos establecidos en la Tabla 2.1 representan a los aceros al carbono (SA), la norma API indica el empleo del grupo A para material no ferrosos y siendo este grupo el que proporciona resultados más rigurosos a comparación de los demás.

La Tabla 2.2 proporciona el valor de temperatura de referencia empleando el esfuerzo de fluencia del material y la clasificación que se obtuvo de la Tabla 2.1. Dado que el esfuerzo de fluencia es igual a 487 MPa se requiere interpolar el valor de T_{ref} , obteniendo como resultado una temperatura de referencia igual a 13.3°C. Cabe resaltar que dicha temperatura es válida para ambos tipos de fisura.

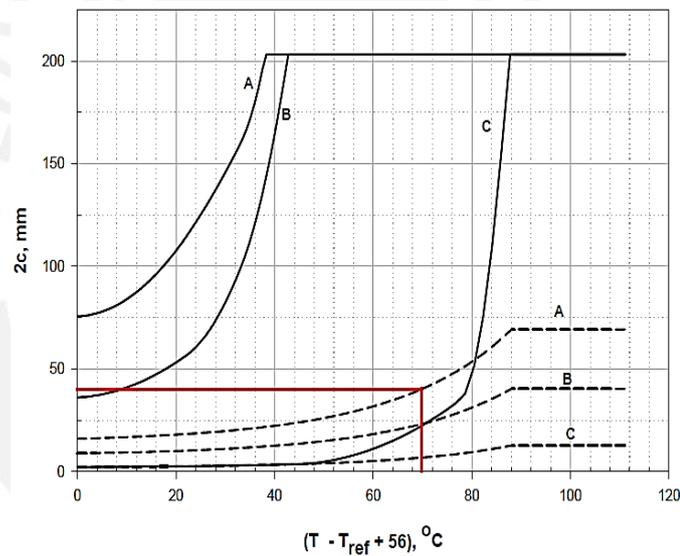
4.1.2.6. Paso 6. Determinación de la longitud de fisura máxima permisible

Para determinar la longitud máxima de la fisura se debe emplear la expresión 2.1.

$$T - T_{ref} + 56^{\circ}C$$

Donde T representa la temperatura de operación (Tabla 4.3) igual a $27^{\circ}C$ y reemplazando los valores en expresión 2.1 se obtiene $69.7^{\circ}C$.

Con el valor determinado se ingresa a las gráficas seleccionadas en el paso 3 (Figura 2.2 a y b) y se intersecta a la curva A con criterio $1 - t$. A partir de la intersección se toma el valor del eje de las ordenadas obteniendo el valor de longitud permisible $2c_{max}$ para los dos tipos de fisura, como se puede apreciar en las figuras 4.1 y 4.2.



Definición de curvas:

Línea sólida (1/4-t)

Línea discontinua (1-t)

A, tamaño del defecto admisible en metales comunes

B, tamaño del defecto admisible en metales soldados con alivio de tensiones residuales

C, tamaño del defecto admisible en metales soldados sin alivio de tensiones residuales

Figura 4.1. Determinación de la longitud de fisura máxima permisible para una fisura transversal.

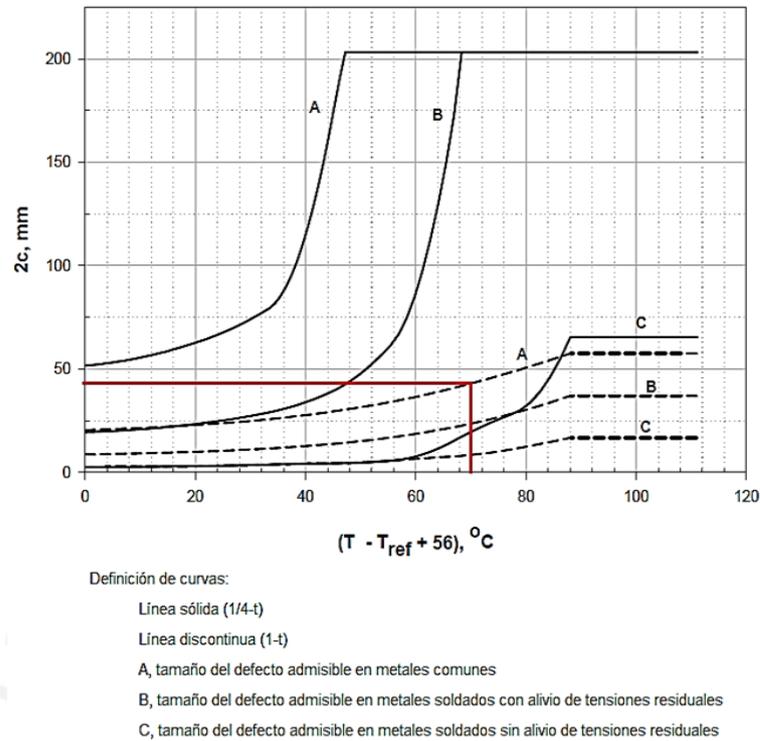


Figura 4.2. Determinación de la longitud de fisura máxima permisible para una fisura longitudinal.

Las longitudes de fisura permisible son de 40 mm para una fisura transversal y de 45 mm para una fisura longitudinal. A continuación, la Tabla 4.5 muestra los valores obtenidos.

Tabla 4.5. Valores de longitud máxima permisible

	$2C_{max}$ (mm)
Fisura transversal	40
Fisura longitudinal	45

4.1.2.7. Paso 7. Evaluación

Obtenidos los valores de longitud máximas permisible, se procedió a la comparación de dichos valores con las características dimensionales de los dos tipos de fisura evaluados (Tabla 4.4). Como se puede apreciar en la Tabla 4.6, los valores de longitud predefinidos son inferiores a los valores máximos permisibles, sin embargo se resaltar que valores permisibles superan las dimensiones de la tubos evaluados.

Tabla 4.6. Comparación de tamaños de fisura

	Tabla 4.4	Tabla 4.5
	$2C$ (mm)	$2C_{max}$ (mm)
Fisura transversal	1.5	40
Fisura longitudinal	1	45

4.1.3. Procedimiento de evaluación nivel 2

4.1.3.1. Paso 1. Identificación de las condiciones de operación

Al igual que el procedimiento de evaluación 1, las condiciones de operación a las cuales se encuentra sometidos los tubos son descritas a en la Tabla 4.3.

4.1.3.2. Paso 2. Caracterización de la carga

De acuerdo a las tres categorías, según descrito en el acápite 2.3.2, los esfuerzos a los cuales se encuentra sometido el componente debido a la presión interna, se encuentran clasificados como esfuerzos primarios. La presente evaluación no se registra esfuerzos secundarios y no se toma en cuenta esfuerzos residuales, ya que el componente no presenta uniones soldadas. La presión interna genera los siguientes esfuerzos primarios:

- Esfuerzo de membrana, σ_m
- Esfuerzo de flexión, σ_b

4.1.3.3. Paso 3. Determinación de las propiedades del material

Las propiedades del material son descritas en la en la Tabla 4.2.

4.1.3.4. Paso 4. Caracterización de la fisura

Al igual que en el procedimiento de evaluación 1, las dimensiones geométricas de las fisuras transversal y longitudinal evaluadas fueron descritas en la Tabla 4.4.

4.1.3.5. Paso 5. Determinación de esfuerzos

La determinación de los esfuerzos de membrana y flexión fue realizada empleando expresiones particulares descritas por la norma, específicamente en el apartado C,

para tuberías con fisuras semi elípticas. A continuación se describen las expresiones mencionadas en cuestión.

- Fisura transversal semi elíptica

$$\sigma_m = \frac{pR_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \quad (4.1)$$

$$\sigma_b = 0 \quad (4.2)$$

- Fisura longitudinal semi elíptica

$$\sigma_m = \frac{pR_i}{t} \quad (4.3)$$

$$\sigma_b = \frac{pR_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \left[\frac{t}{R_i} - \frac{3}{2} \left(\frac{t}{R_i} \right)^2 + \frac{9}{5} \left(\frac{t}{R_i} \right)^3 \right] \quad (4.4)$$

Donde

p : Presión interna actuante en la tubería.

R_o : Radio exterior de la tubería.

R_i : Radio interior de la tubería.

t : Espesor de la tubería

De acuerdo a la Tabla 4.1 las características geométricas de la tubería son R_o igual a 6.55 mm , R_i igual a 6.55 mm y t igual a 0.5 mm . El valor de presión interna igual a 12.459 MPa , descrito en la Tabla 4.3. Reemplazando los valores señalados en las expresiones 4.1 – 4.4, se obtienen los siguientes resultados.

Fisura transversal $\sigma_m = \frac{pR_i^2}{R_o^2 - R_i^2} = 70.64 \text{ MPa}$

$$\sigma_b = 0$$

Fisura longitudinal $\sigma_m = \frac{pR_i}{t} = 147.12 \text{ MPa}$

$$\sigma_b = \frac{pR_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \left[\frac{t}{R_i} - \frac{3}{2} \left(\frac{t}{R_i} \right)^2 + \frac{9}{5} \left(\frac{t}{R_i} \right)^3 \right] = 6.08 \text{ MPa}$$

Cabe señalar que los esfuerzos de membrana y flexión pueden ser obtenidos de soluciones analíticas o mediante análisis por elementos finitos, según lo indicado por la misma norma. Con la finalidad de complementar el estudio, se procede a realizar la simulación por elementos finitos con la finalidad de obtener dichos esfuerzos empleando el modelo computacional implementado en el capítulo 3.

El modelo del tubo (vainas de combustión) fue discretizado por elementos tetraédricos de 0.5 mm de lado, tal como se puede apreciar en las Figura 4.3.

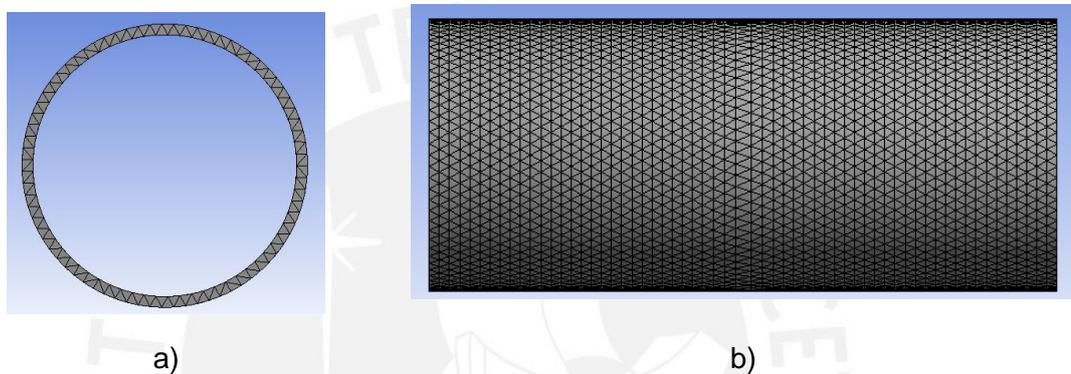


Figura 4.3. Discretización del tubo - (a) vista transversal y (b) vista longitudinal

Las restricciones y cargas impuestas al modelo mallado son descritas en el acápite 3.6.1 y 3.6.2. El valor de presión interna, descrita en la Tabla 4.3, es igual a 12.46 MPa.

Como ya se había mencionado en el acápite 3.6.2, los esfuerzos tangenciales sobre el tubo resultan de la aplicación de la presión interna, mientras que los esfuerzos longitudinales requieren ser impuesto ya que el modelo desarrollado no posee tapas. Para ello, se plantea la expresión 4.5, la cual permite determinar el esfuerzo longitudinal que es aplicado en la superficie transversal libre del tubo, como se aprecia en la Figura 4.4.

$$\sigma_l = \frac{p R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \quad (4.5)$$

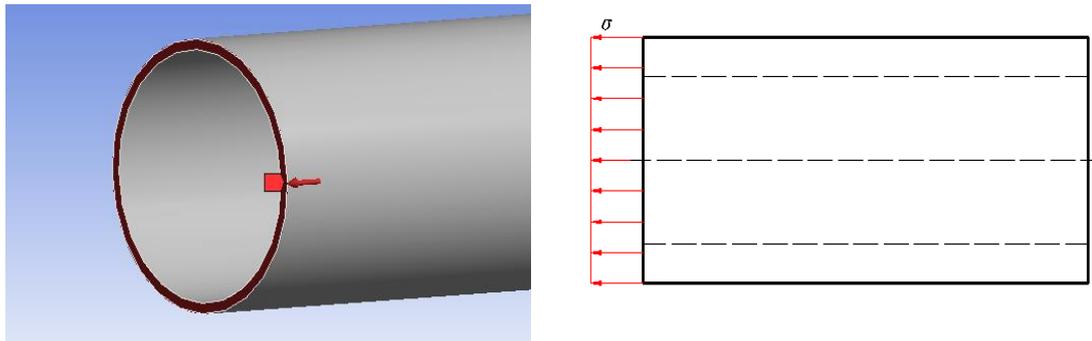
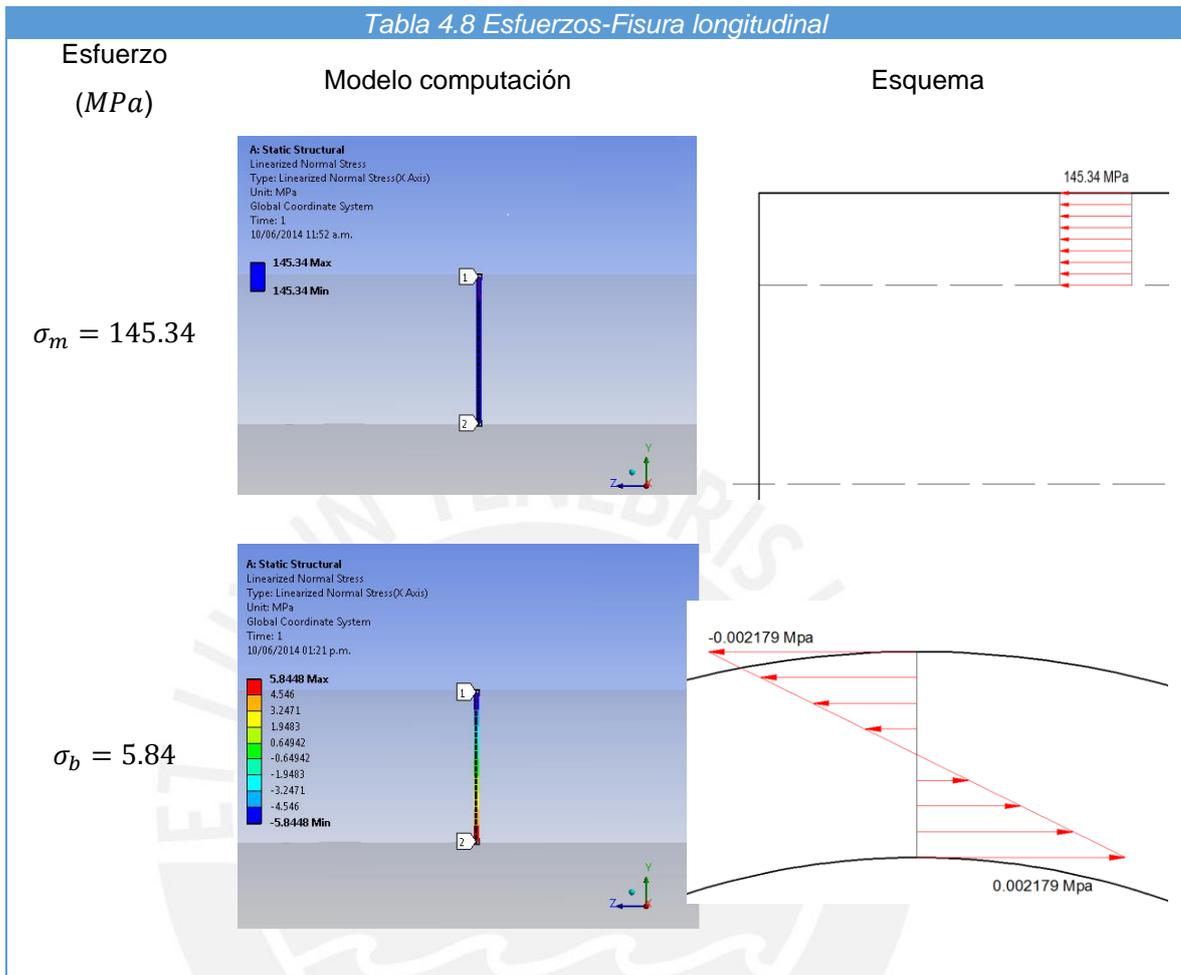


Figura 4.4. Aplicación de una carga axial que genere esfuerzos longitudinales.

A continuación se presentan los esfuerzos obtenidos mediante simulación computacional

Tabla 4.7 Esfuerzos -Fisura transversal		
Esfuerzo (MPa)	Modelo computación	Esquema
$\sigma_m = 69.74$ $\sigma_b = 0$		



Los valores de los esfuerzos de membrana σ_m y flexión σ_b obtenidos a través de las expresiones analíticas y de la simulación computacional por el método de los elementos finitos, son mostrados en la siguiente tabla resumen (Tabla 4.9).

Tabla 4.9. Esfuerzos de membrana y de flexión hallados.

	Norma API 579		Simulación del MEF		% Error Tran.	% Error Long
	Fisura		Fisura			
	Transversal	Longitudinal	Transversal	Longitudinal		
σ_m (MPa)	70.64	147.12	69.70	145.34	1.33	1.21
σ_b (Mpa)	0.00	6.08	0.00	5.84	0	3.94

4.1.3.6. Paso 6. Selección de factores parciales de seguridad PSF

El procedimiento de evaluación establece la selección de factores parciales de seguridad PSF establecidos en la Tabla 2.3. La selección de los factores depende de las siguientes variables:

- *Profundidad de la fisura.*
El valor de la profundidad es tomado de la Tabla 4.1, donde a es igual a 0.25mm.
- *Esfuerzo de fluencia del material, σ_{ys} .*
El valor del esfuerzo de fluencia es tomado de la Tabla 4.2, donde σ_{ys} es igual a 487 MPa
- *Tenacidad a la fractura del material, K_{mat} .*
El valor de la tenacidad a la fractura es tomado de la Tabla 4.2, donde K_{mat} es igual a 3478 ($MPa\sqrt{mm}$)
- *Probabilidad de falla, p_f .*
Al no contar con un estudio estadístico de falla se selecciona el valor más alto de la probabilidad, igual a 2.3×10^{-2} .
- *Índice de seguridad, β .*
Al no contar con un estudio estadístico de falla se selecciona el menor índice de seguridad, igual a 2.
- *Coefficiente de variación, COV_s .*
Se considera un valor de COV_s igual a 0.1, ya que los esfuerzos determinados son valores confiables.
- *Valor de corte entre colapso frágil/plástico y plástico, R_c .*
De acuerdo al valor de p_f , su valor queda definido en 1.
- *Relación entre la tenacidad de fractura con el esfuerzo de fluencia, R_{Ky} .*
De acuerdo a la expresión 2.5, el valor determinado es igual a 1.14.

Definidas las variables y tomando en cuenta la Tabla 2.3, se procede a la selección de los factores parciales de seguridad, PSF_s , PSF_k y PSF_a , tal como se muestra en la Figura 4.5.

Shallow Cracks: $a < 5 \text{ mm}$ (0.2 inches) (1)								
Probability Of Failure Category (2)	COV_s (3)	R_c (4)	$R_{kv} \leq R_c$ (5),(6)			$R_{kv} > R_c$ (5),(6)		
			PSF_s	PSF_k	PSF_a	PSF_s	PSF_k	PSF_a
$p_f = 2.3(10^{-2})$ ($\beta = 2.0$)	0.10	1.0	1.20	1.43	1.08	1.25	1.0	1.0
	0.20	1.0	1.30	1.43	1.08	1.50	1.0	1.0
	0.30	1.0	1.55	1.43	1.08	1.75	1.0	1.0
$p_f = 10^{-3}$ ($\beta = 3.09$)	0.10	1.4	1.40	1.43	1.20	1.50	1.0	1.0
	0.20	1.4	1.50	1.82	1.10	2.0	1.0	1.0
	0.30	1.4	2.00	2.0	1.05	2.50	1.0	1.0
$p_f = 10^{-6}$ ($\beta = 4.75$)	0.10	2.0	1.75	2.0	1.35	2.00	1.0	1.0
	0.20	2.0	2.50	2.0	1.50	3.10	1.0	1.0
	0.30	2.0	2.6	2.0	1.50	4.10	1.0	1.0

Figura 4.5. Selección de factores parciales de seguridad FSF para la evaluación nivel 2.

4.1.3.7. Paso 7. Afectación de esfuerzos, propiedades del material y tamaño de fisura

Seleccionados los factores parciales de seguridad, se procedió a afectar a esfuerzos, tenacidad del material y profundidad de la fisura, tal como se describió en el acápite 2.3.7. Los valores afectados son plasmados en la siguiente Tabla 4.10

Tabla 4.10. Valores modificados- fisura transversal y longitudinal				
Fisura	$P_m = \sigma_m \cdot PSF_s$ (MPa)	$P_b = \sigma_b \cdot PSF_s$ (MPa)	$K_{mat} \cdot PSF_k$ (MPa \sqrt{mm})	$a \cdot PSF_a$ (mm)
Transversal	88.303	0	3478	0.25
Longitudinal	183.905	7.598	3478	0.25

4.1.3.8. Paso 8. Determinación del esfuerzo de referencia

La determinación del esfuerzo de referencia se realizó a través de la expresión 2.10 descrita en el acápite 2.3.8.

$$\sigma_{ref} = \frac{P_b + (P_b^2 + 9\{Z \cdot P_m \cdot (1 - \alpha)^2\}^2)^{0.5}}{3(1 - \alpha)^2}$$

Donde a partir de las características geométricas de la tubería (Tabla 4.1), los esfuerzos afectados de membrana y flexión (Tabla 4.10) y las dimensiones geométricas afectadas de la fisura (Tabla 4.10), se obtuvieron los siguientes resultados para los dos tipos de fisura evaluados.

<i>Tabla 4.11 Esfuerzos de referencia hallados</i>		
	Fisura transversal	Fisura longitudinal
σ_{ref} (MPa)	90.83	198.01

La determinación del esfuerzo de referencia mediante simulación numérica, es posible según lo señalado por la norma, pero no indica el cómo ni de dónde. De acuerdo a la expresión 2.10 es posible inferir que el esfuerzo de referencia cuantifica la suma de los esfuerzos de membrana y flexión contemplando un incremento de su valor debido a la presencia de la fisura. Por otro lado, la simulación es capaz de obtener los valores de esfuerzos de cualquier punto del modelo analizado. Entonces, ante la falta de la ubicación física de dónde se encuentra actuando el esfuerzo de referencia, la cual se requiere conocer para que a partir de ella se pueda obtener los valores por simulación; se procedió a la construcción de curvas, para una determinada relación de a/c , que correlacionan la longitud de la fisura con una dimensión que caracterice la ubicación del esfuerzo de referencia. Cabe señalar que para la construcción de las curvas se empleó la expresión analítica del esfuerzo (2.10). El procedimiento realizado para la obtención de las curvas de correlación se encuentra descrito en su totalidad en el Anexo 1.

A continuación se presentan las curvas de correlación para ambos tipos de fisura. En la figura 4.6 se aprecia la gráfica que a partir de la semi longitud de fisura c , se obtiene un valor de α , el cual permite ubicar el esfuerzo de referencia en el modelo computacional que contiene la fisura transversal. Caso similar ocurre en la gráfica de la Figura 4.7, donde a partir de la semi longitud de fisura c , se obtiene un valor de x , el cual permite ubicar el esfuerzo de referencia en el modelo computacional que contiene la fisura longitudinal.

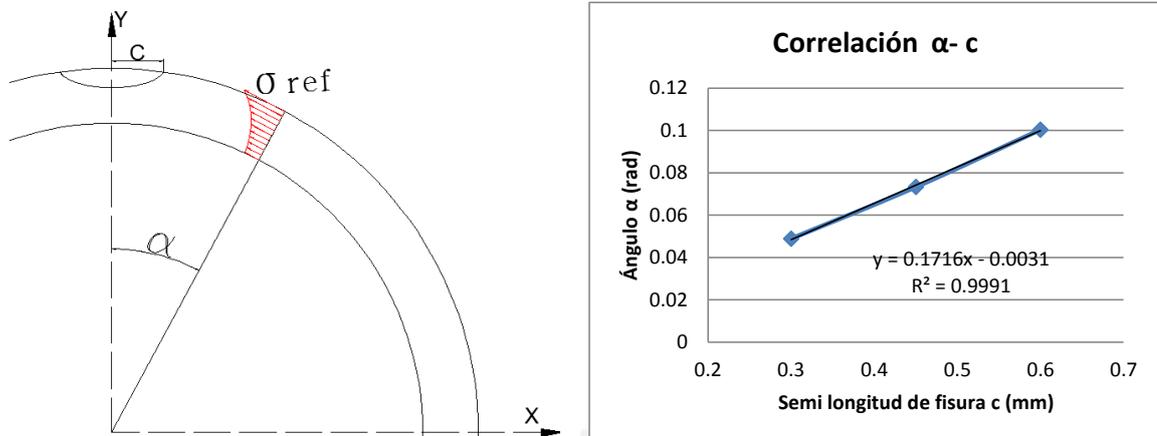


Figura 4.6. Correlación para la ubicación del σ_{ref} -fisura transversal

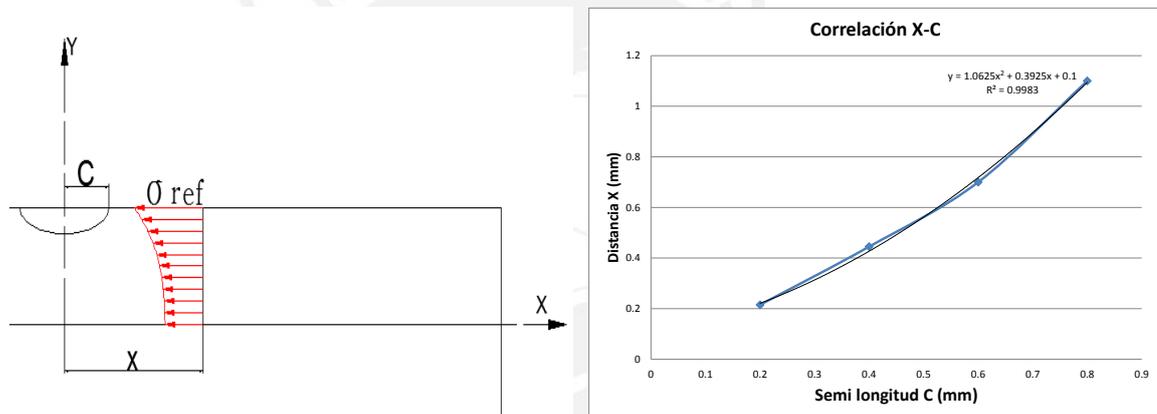


Figura 4.7. Correlación para la ubicación del σ_{ref} -fisura longitudinal

Empleando la gráfica de la Figura 4.6, se obtuvo $\alpha = 0.126 \text{ rad}$ que ubica el σ_{ref} a partir de la semi longitud $c = 0.75 \text{ mm}$. Hallado el valor de α , se procedió a la obtención del esfuerzo de referencia empleando el modelo computacional, el cual proporcione un valor de σ_{ref} igual a 90.759 MPa

Empleando la gráfica de la Figura 4.7, se obtuvo $x = 0.5618 \text{ mm}$ que ubica el σ_{ref} a partir de la semi longitud $c = 0.5 \text{ mm}$. Hallado el valor de x , se procedió a la obtención del esfuerzo de referencia empleando el modelo computacional, el cual proporcione un valor de σ_{ref} igual a 205 MPa .

A continuación se resume en la Tabla 4.12 los valores de los esfuerzos de referencia obtenidos empleando las expresiones analíticas y por simulación computacional.

Tabla 4.12 Esfuerzos de referencia hallados

$\sigma_{ref}(MPa)$	Norma API 579		Simulación del MEF		%	%
	Fisura		Fisura		Error	Error
	Transversal	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Trans	Long
	90.825	198.01	90.759	205	0.07	3.53

4.1.3.9. Paso 9. Determinación del factor de intensidad de tensiones

La determinación del factor de intensidad de tensiones K_I se realizó empleando las expresiones 2.24 y 2.29, descritas en acápite 2.3.9.

Fisura Transversal

$$K_I = G_0 \left(\frac{pR_i^2}{R_0^2 - R_i^2} + \frac{F}{\pi(R_0^2 - R_i^2)} \right) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}$$

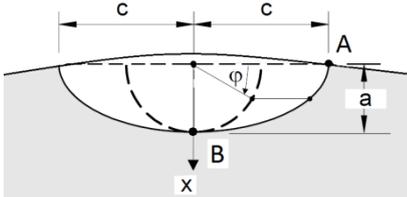
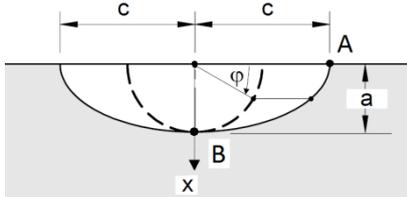
Fisura Longitudinal

$$K_I = \frac{pR_i^2}{R_0^2 - R_i^2} \left[2G_0 - 2G_1 \left(\frac{a}{R_0} \right) + 3G_2 \left(\frac{a}{R_0} \right)^2 - 4G_3 \left(\frac{a}{R_0} \right)^3 + 5G_4 \left(\frac{a}{R_0} \right)^4 \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}$$

Para ello se toman en cuenta las dimensiones geométricas modificadas de la fisura (Tabla 4.10), las dimensiones geométricas de la tubería (Tabla 4.1) y la presión interna a la cual está sometida la tubería (Tabla 4.3); dando como resultado los siguientes valores descritos en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13 Factores de intensidad de tensión hallados

	Fisura transversal	Fisura longitudinal
φ	$K_I(MPa\sqrt{mm})$	$K_I(MPa\sqrt{mm})$
0°	47.395	117.339
90°	83.233	133.916

Cabe recordar que K_I puede ser obtenido de soluciones analíticas o mediante análisis por elementos finitos, según lo expresado por la norma. Por ello, se procede a la simulación numérica para la obtención de dicho factor empleando el modelo computacional implementado en el capítulo 3.

El modelo del tubo (vainas de combustión) fue discretizado por elementos tetraédricos de 0.5 mm de lado. Debido a la necesidad de obtener resultados precisos del frente de la fisura, se procede a imponer una malla más fina alrededor de la fisura como se puede apreciar en las Figuras 4.8 y 4.9.

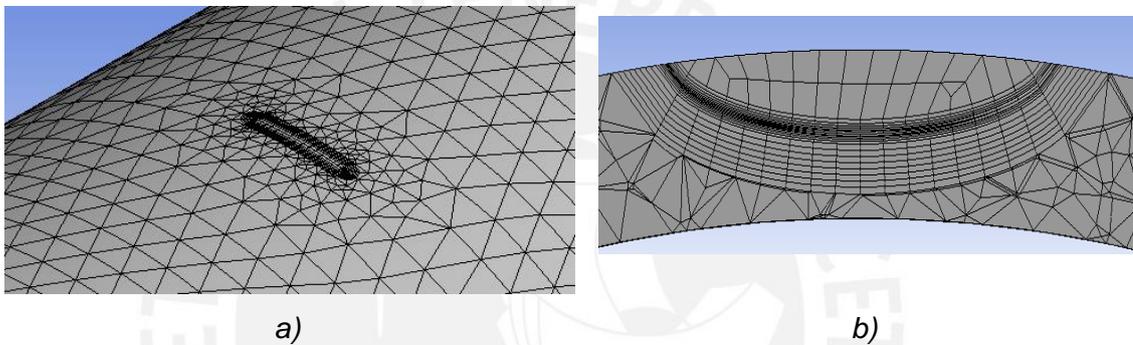


Figura 4.8. Discretización de la fisura transversal (a) vista isométrica (b) vista en sección.

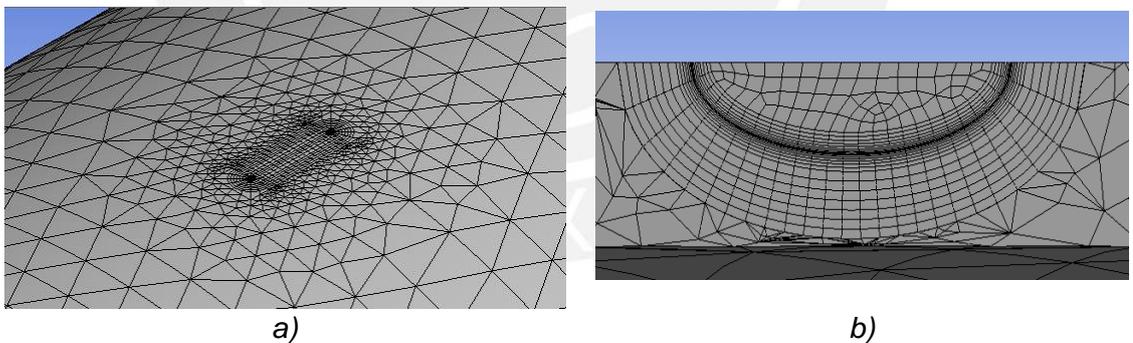
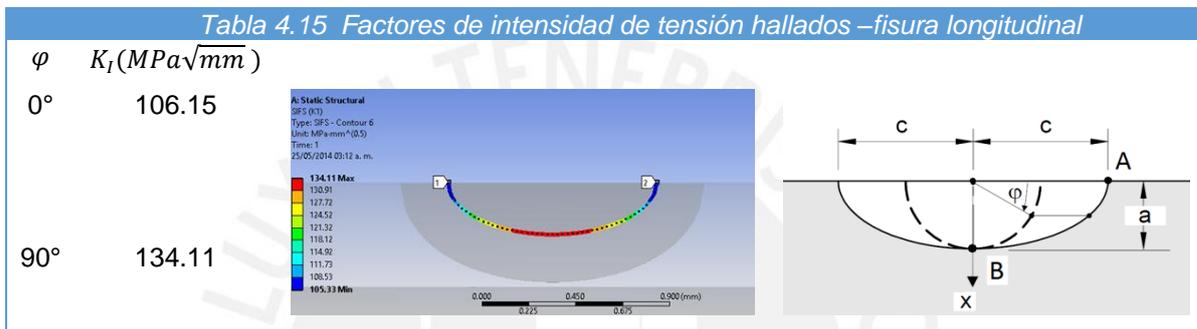
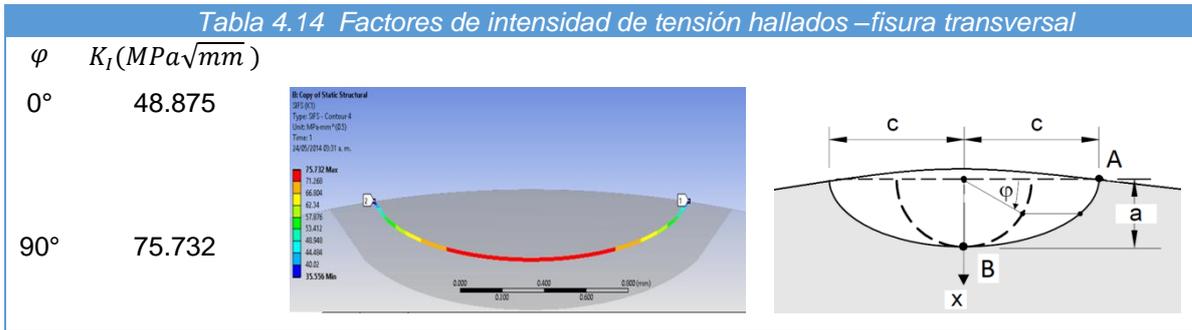


Figura 4.9 Discretización de la fisura longitudinal (a) vista isométrica (b) vista en sección.

La imposición de restricciones y cargas al tubo fisurado evaluado, son las mismas que se impuso en el modelo para la obtención de los esfuerzos de membrana y de flexión.

A continuación, en las Tablas 4.14 y 4.15 se presenta los resultados obtenidos de K_I mediante la simulación computacional.



A continuación se resume en la Tabla 4.16 los valores de los factores de intensidad de tensión obtenidos para los dos tipos de fisura evaluados, empleando las expresiones analíticas y la simulación computacional.

Tabla 4.16 Factores de intensidad de tensión hallados-resumen

φ	Fisura transversal			Fisura longitudinal		
	Norma	Simulación del	%	Norma	Simulación del	%
	API 579	MEF	Error	API 579	MEF	Error
	$K_I (MPa\sqrt{mm})$	$K_I (MPa\sqrt{mm})$		$K_I (MPa\sqrt{mm})$	$K_I (MPa\sqrt{mm})$	
0°	47.395	48.875	3.12	117.339	106.15	9.53
90°	83.233	75.732	9	133.916	134.11	0.14

4.1.3.10. Paso 10. Determinación del factor de carga y de tenacidad

La obtención del factor de carga y de tenacidad del tubo evaluado se realizó empleando las expresiones descritas en acápite 2.3.10, para ello se tomó en cuenta los valores de los esfuerzos de referencia hallados (Tabla 4.12), los factores de intensidad de tensión obtenidos (Tabla 4.16), el esfuerzo de fluencia del material

(Tabla 4.2) y la tenacidad a la fractura del material modificado (Tabla 4.10); dando como resultado los siguientes valores descritos en la Tablas 4.17, 4.18

Tabla 4.17 Factores de carga hallados

	Norma API 579		Simulación del MEF	
	Fisura		Fisura	
	Transversal	Longitudinal	Transversal	Longitudinal
L_r	0.186	0.406	0.186	0.421

Tabla 4.18 Factores de tenacidad hallados

	Fisura transversal		Fisura longitudinal	
	Norma	Simulación del	Norma	Simulación del
	API 579	MEF	API 579	MEF
φ	K_r	K_r	K_r	K_r
0°	0.01362	0.01405	0.0337	0.03052
90°	0.02393	0.02177	0.0385	0.03856

4.1.3.1. Paso 11. Determinación de la gráfica FAD

La determinación de la gráfica FAD se realizó empleando la siguiente expresión 2.45, extraída del acápite 2.3.11.

$$K_r = [1 - 0.14(L_r)^2]\{0.3 + 0.7 \exp[-0.65(L_r)^6]\}$$

A continuación se presenta la gráfica FAD obtenida

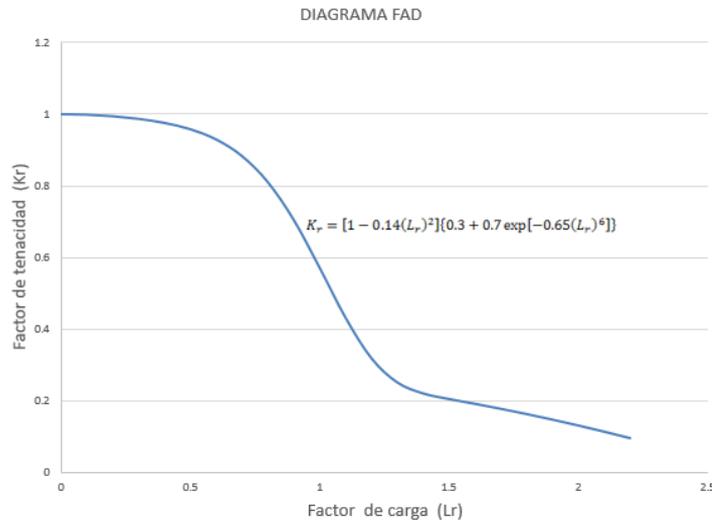


Figura 4.10 Grafica FAD obtenida

4.1.3.2. Paso 12. Evaluación

Obtenido los valores de L_r y K_r (Tabla 4.17, Tabla 4.18) y determinada la gráfica FAD (Figura 4.10), se procedió a la inserción de los punto obtenidos por la intersección de los valores de L_r y K_r ., tal como se aprecia en la siguiente figura

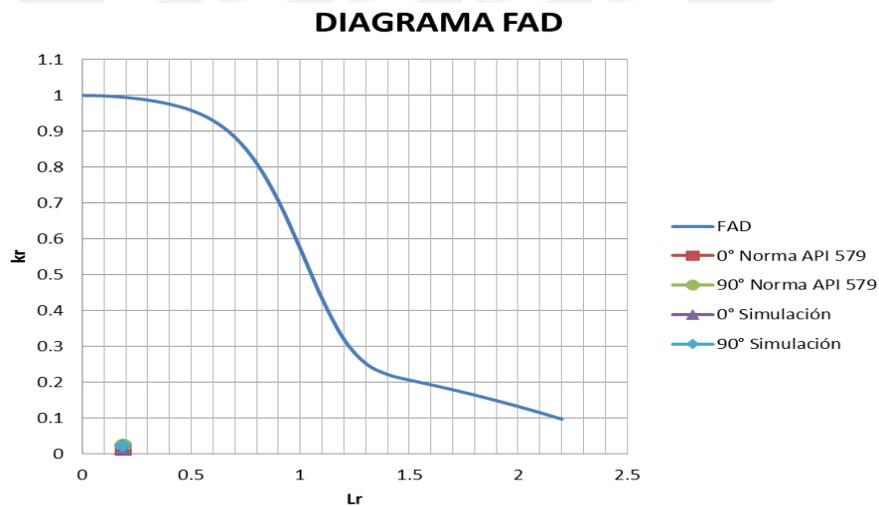


Figura 4.11 Evaluación del tubo fisurado empleando la gráfica FAD

Tomando en cuenta lo descrito en el acápite 2.3.12, donde se establece el criterio de evaluación de un componente fisurado, se aprecia que los puntos obtenidos se encuentran en la región establecida como apta para el servicio.

4.2. Evaluación ducto API 5L grado X70

Con la finalidad de aplicar los procedimientos de evaluación implementados y los modelos computacionales desarrollados, se somete a estudio una tubería fisurada de 14 in de diámetro, bajo la misma presión de operación del poliducto de Camisea que falló el 22 de diciembre de 2004. .

4.2.1. Descripción del Caso

La tubería evaluada forma parte del poliducto de Camisea, el cual transporta líquidos de gas natural desde la planta de gas las Malvinas hasta la planta de fraccionamiento en Pisco. En esta tubería se apreció una falla transversal que trajo como consecuencia el derramamiento de aproximadamente 70 m^3 del hidrocarburo ocasionando inconvenientes medioambientales.

Con la finalidad de entender lo ocurrido, se procedió a la evaluación de la tubería afectada por una fisura transversal y al análisis de la influencia de dicho defecto sobre la integridad del componente; la Tabla 4.19 presenta las características geométricas de la tubería evaluada

Diámetro interior D_i (mm)	Diámetro exterior D_o (mm)	Espesor t (mm)
338.2	355.6	8.7

El material del cual está conformada la tubería es el API 5L X70, y cuyas propiedades mecánicas son descritas en la Tabla 4.20.

Esfuerzo de fluencia (N/mm^2)	Esfuerzo de tracción (N/mm^2)	Tenacidad a la fractura ($MPa\sqrt{mm}$)
485	570	7267.4

La tenacidad a la fractura del material indicada en la Tabla 4.20 fue obtenida empleando la energía absorbida durante la fractura (CVN), el esfuerzo de fluencia del material (σ_{YS}) y la expresión 4.6, extraída del anexo F de la norma API 579, la cual relaciona estos dos valores con la finalidad de obtener el K_{IC} del material evaluado.

$$K_{IC} = \sqrt{(\sigma_{YS})^2 0.64 \left(\frac{CVN}{\sigma_{YS}} - 0.01 \right)} \quad (4.6)$$

Donde:

- K_{IC} : tenacidad a la fractura del material
- σ_{YS} : esfuerzo de fluencia
- CVN : energía absorbida durante la fractura

Cabe señalar que el valor del CVN del material (API 5L X70) es obtenido del trabajo realizado por D. Belato Rosado [13], cuyo valor es 175 J.

Así mismo con el objetivo de evaluar la influencia de la temperatura y la fragilización producto de la soldadura, se contempló la disminución de la tenacidad del material desde el valor máximo establecido anteriormente ($229.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$) hasta un valor mínimo, el cual es obtenido empleando la expresión 4.6 y el valor de CVN igual a 27 J, este último valor representa la mínima energía absorbida durante la fractura establecida por la normativa API que puede poseer el API 5 L para su empleo; esta consideración se estableció ante la falta de datos experimentales que permitan obtener la tenacidad del material afectado por los dos aspectos externos considerados (temperatura y soldadura).

Teniendo en cuenta lo descrito, se realizó la evaluación de la tubería fisurada considerando los siguientes valores de tenacidad del material (API 5L), los cuales se encuentran plasmados en la siguiente Tabla 4.21.

<i>Tabla 4. 21 Tenacidades a la fractura del API 5L contemplados</i>		
K1 (MPa)	K2 (MPa)	K3 (MPa)
6000	4000	2622.1

Las condiciones de operación a las cuales está sometida la tubería son descritas en la Tabla 4.22.

<i>Tabla 4. 22 Condiciones de operación</i>	
Presión interna	Temperatura
(MPa)	(°C)
10	27

La evaluación del comportamiento de la fisura presente en la tubería comprende el análisis de diferentes variantes que atienden a cambios dimensionales de la misma. El parámetro a que representa el semieje menor de la elipse ubicado a lo largo del espesor de la tubería varía de 0.5 mm hasta 8.7 mm , mientras que el semieje mayor c ubicado sobre la superficie varía de 2 mm hasta 34.8 mm ; manteniendo la relación $c/a = 2$ constante.

Las dimensiones geométricas de las fisuras evaluadas se encuentran plasmadas en la siguiente Tabla 4.23.

Tabla 4.23 Fisuras evaluadas

Profundidad a (mm)	Longitud $2c$ (mm)	c/a
0.5	2	2
1	4	2
2	8	2
2.5	10	2
3	12	2
3.48	13.92	2
4	16	2
5.22	20.88	2
6	24	2
6.5	26	2
6.96	27.84	2
8.7	34.8	2

Así mismo en búsqueda de evaluar el comportamiento del componente fisurado ante diversas condiciones de operación, se procedió a emplear el proceso de evaluación y el modelo computacional desarrollado considerando las siguientes presiones internas plasmadas en la Tabla 2.24

Tabla 4.24 Presiones internas

Presión interna (MPa)	
P1	10
P2	20
P3	30
P4	40

4.2.2. Modelo Geométrico

Se inicia el análisis mediante la simulación computacional generándose el modelo geométrico, para ello se emplea las directivas descritas en el acápite 3.3 y herramientas computacionales que permitan la generación del sólido 3D; el modelo geométrico corresponde a un cuerpo cilindro en el cual la fisura está localizada en la parte media y posee dos frentes de propagación, sobre la superficie del componente y a través del espesor de pared, tal como se aprecia en las siguientes figuras.

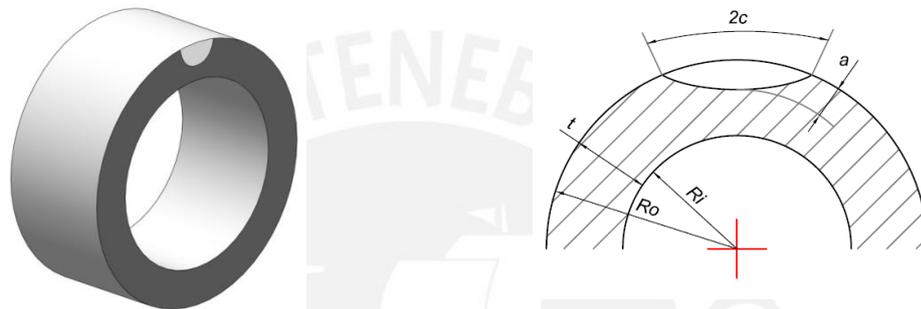


Figura 4.12 Modelo Geométrico de tubería fisurada

4.2.3. Propiedades del materia

Las propiedades del material del cual está conformada la tubería se encuentran descritas en la Tabla 4.20.

4.2.4. Discretización del modelo

El modelo de la tubería fue discretizado por elementos tetraédricos de 8.7 mm . Debido a la necesidad de obtener resultados precisos del frente de la fisura, se procede a imponer una malla más fina alrededor de la fisura como se puede apreciar en las Figuras 4.13 y 4.14.

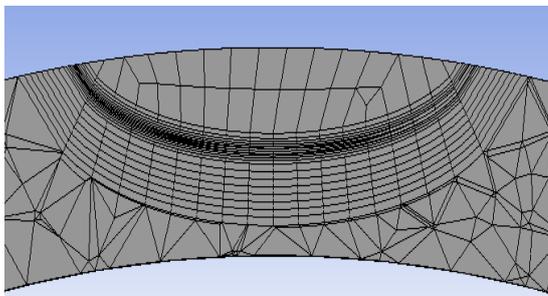


Figura 4.13 Discretización de la fisura transversal

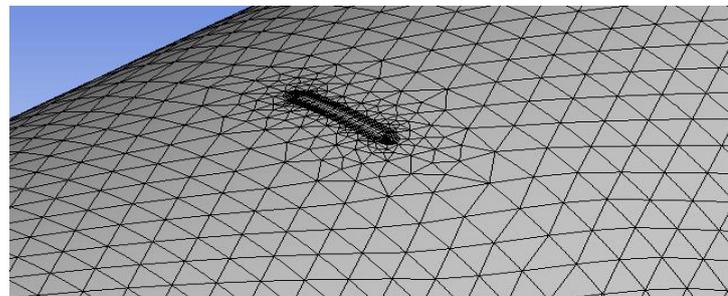


Figura 4.14 Discretización de la fisura transversal

4.2.5. Condiciones de contorno

4.2.5.1. Restricciones

Con la finalidad de determinar los parámetros buscados mediante el modelo computacional desarrollado se restringe la tubería a un grado de libertad igual a cero, para ello se toma en cuenta lo mencionado en el acápite 3.6.1.

4.2.5.2. Aplicación de carga

Los valores de las presiones internas aplicadas al modelo computacional se encuentran descritos en la Tabla 4.24.

Así mismo se añade un esfuerzo perpendicular a la superficie transversal de la tubería, tal como se aprecia en la Figura 4.15.; dicho esfuerzo representa el efecto axial de la presión interna sobre el componente, el valor del esfuerzo aplicado depende de la presión interna aplicada y sus valores se encuentran plasmados en la siguiente Tabla 4.25.

Tabla 4.25 Esfuerzos axiales	
Esfuerzos (MPa)	
σ_1	94.746
σ_2	189.493
σ_3	284.239
σ_4	378.986

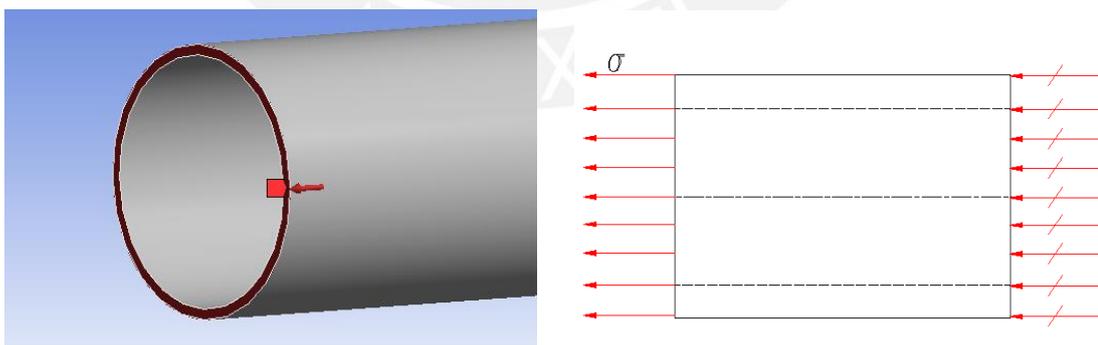


Figura 4. 15 Aplicación del esfuerzo transversal a la tubería

4.2.6. Simulación

Tomando en cuenta todo lo señalado con anterioridad se procede a la simulación de la tubería fisurada empleando el programa de cálculo computacional ANSYS 15.0 para cada uno de los casos señalados. Hecho esto, se procede a la evaluación de los resultados obtenidos.

4.2.7. Resultados

La simulación nos brinda los valores de los parámetros necesarios para la evaluación de la integridad estructural de una tubería fisurada.

4.2.7.1. Esfuerzos de membrana

En la Figura 4.16 se puede apreciar el esfuerzo de membrana uniforme a lo largo del espesor de la tubería al ser sometida a una presión interna de 20 MPa, de igual manera se obtuvo el esfuerzo de membrana para cada presión aplicada, los cuales son plasmados en la Tabla 4.26.

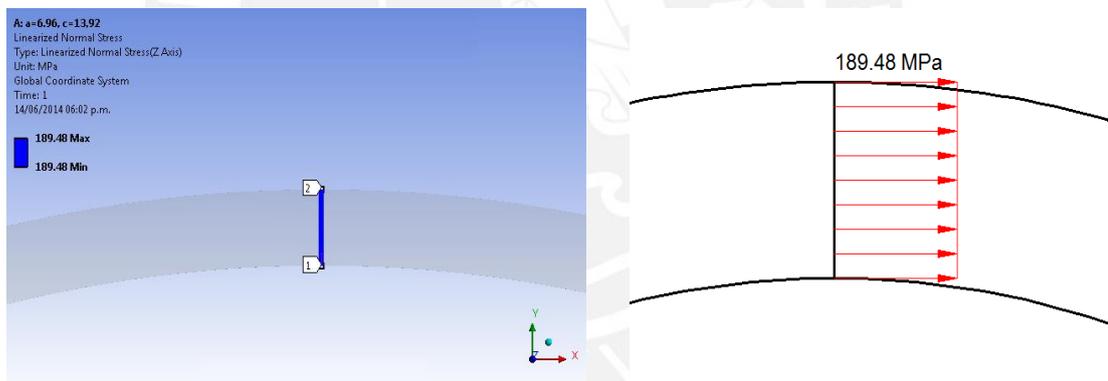


Figura 4. 16 Esfuerzo de membrana a lo largo del espesor de la tubería afectada por una fisura transversal semi-elíptica- presión 20 MPa

Tabla 4. 26 Esfuerzo de membrana hallados		
	Presión interna (MPa)	Esfuerzo de membrana (MPa)
P1	10	94.739
P2	20	189.48
P3	30	284.22
P4	40	378.96

4.2.7.2. Esfuerzos de flexión

El valor del esfuerzo de flexión obtenido mediante el modelo computacional es iguala 0 MPa, para cada valor de presión aplicada.

4.2.7.3. Esfuerzos de referencia

La obtención del esfuerzo de referencia no se realizó de forma directa, ya que al no estar definida la ubicación exacta de dicho esfuerzo por la norma API 579, se realizó una serie de simulaciones de la tubería para cada caso evaluado, con la finalidad de obtener una tendencia que permita ubicar el esfuerzo descrito en función de las dimensiones de la fisura.

Realizada las serie de simulaciones y con la ayuda del esquema presentado en la Figura 4.17, se obtuvo la tendencia que permita ubicar, a través del ángulo α , el esfuerzo de referencia en función de la longitud de la fisura; cabe resaltar que la tendencia hallada es válida únicamente para la tubería evaluada y la relación $a/c = 2$. La tendencia hallada se encuentra plasmada en la Figura 4.18.

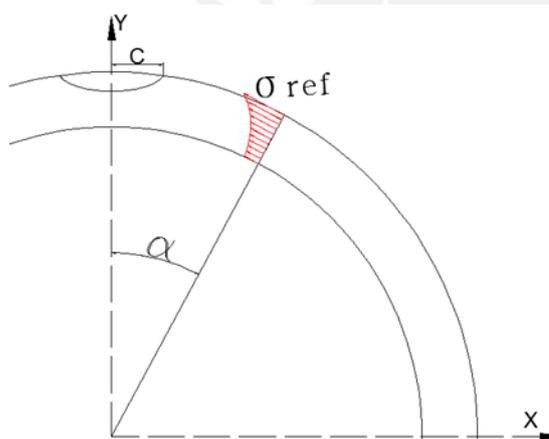


Figura 4.17 Esquema del esfuerzo de referencia

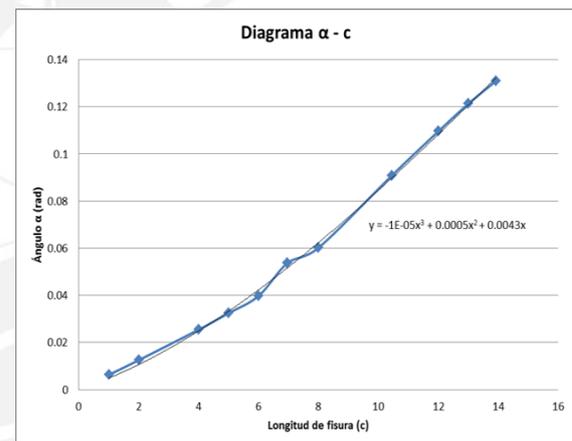


Figura 4.18 Correlación para la ubicación del σ_{ref} -fisura transversal

En base a la tendencia hallada y para cada presión interna aplicada se obtuvieron los esfuerzos de referencia para cada fisura evaluada, los cuales son plasmados en la siguiente Tabla 4.27

Tabla 4. 27 Esfuerzos de referencia hallados para cada presión aplicada

		$P_i = 10 \text{ MPa}$	$P_i = 20 \text{ MPa}$	$P_i = 30 \text{ MPa}$	$P_i = 40 \text{ MPa}$
a (mm)	2c (mm)	$\sigma_{ref} \text{ (MPa)}$	$\sigma_{ref} \text{ (MPa)}$	$\sigma_{ref} \text{ (MPa)}$	$\sigma_{ref} \text{ (MPa)}$
0.5	2	118.74	237.48	356.22	474.96
1	4	118.95	237.91	356.86	475.81
2	8	118.60	237.22	355.83	474.44
2.5	10	119.46	238.92	358.38	477.84
3	12	119.28	238.56	357.83	477.11
3.48	13.92	119.34	238.68	358.02	477.36
4	16	119.59	239.17	358.76	478.35
5.22	20.88	120.58	241.17	361.75	482.34
6	24	121.00	242.00	362.99	483.99
6.5	26	121.56	243.12	364.68	486.24
6.96	27.84	122.13	244.26	366.38	488.51
8.7	17.4	117.76	235.53	353.3	471.06

4.2.7.4. Factor de intensidad de tensiones (K_I)

Realizada la simulación de la tubería afectada por la fisura transversal semi-elíptica, se obtuvieron los factores de intensidad de tensiones K_I a lo largo del frente de fisura, para cada presión interna aplicada, tal como se aprecia en la siguiente Figura 4.19.

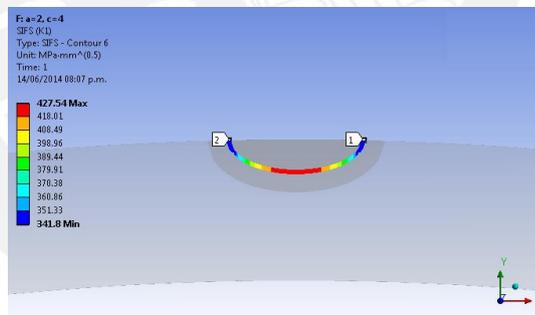


Figura 4.19 Factor de intensidad de tensiones (K) a lo largo del frente de fisura-fisura transversal $a=2\text{mm}$, $c=4\text{mm}$ y una presión interna aplicada de 20MPa

A continuación se presentan los factores de intensidad de tensiones (K) críticos hallados a lo largo del frente de fisura para cada fisura evaluada y presión interna aplicada; los valores obtenidos son plasmados en la siguiente Tabla 4.28.

Tabla 4. 28 Factores de intensidad de tensión hallados para cada presión aplicada

		$P_i = 10 \text{ MPa}$	$P_i = 20 \text{ MPa}$	$P_i = 30 \text{ MPa}$	$P_i = 40 \text{ MPa}$
a (mm)	2c (mm)	$K_I (\text{MPa}\sqrt{\text{mm}})$	$K_I (\text{MPa}\sqrt{\text{mm}})$	$K_I (\text{MPa}\sqrt{\text{mm}})$	$K_I (\text{MPa}\sqrt{\text{mm}})$
0.5	2	103.22	206.43	309.65	412.87
1	4	147.53	295.06	442.58	590.11
2	8	213.76	427.54	641.30	855.08
2.5	10	245.89	491.79	737.68	983.57
3	12	273.7	547.4	821.11	1094.8
3.48	13.92	300.36	600.71	901.07	1201.4
4	16	329.16	658.32	987.47	1316.6
5.22	20.88	390.48	780.96	1171.4	1561.9
6	24	424.16	848.32	1272.5	1696.6
6.5	26	448.64	897.28	1345.9	1794.6
6.96	27.84	468.71	937.41	1406.1	1874.8
8.7	17.4	553.52	1107	1660.6	2214.1

4.2.8. Evaluación

Obtenidos los parámetros necesarios para la evaluación de la integridad de la tubería fisurada, se procede a la obtención de los factores de tenacidad (K_r) y de carga (L_r), los cuales se hallan mediante las siguientes expresiones

$$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}}$$

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_{YS}}$$

Donde

- K_I : factor de intensidad de tensiones
- K_{mat} : tenacidad del material
- σ_{ref} : esfuerzo de referencia
- σ_{YS} : esfuerzo de fluencia del material

Empleando las expresiones descritas y los valores de K_I y σ_{ref} hallados para cada fisura y presión aplicada, se obtienen los valores de K_r y L_r , los cuales son plasmados en las siguiente Tabla 4.29.

Tabla 4. 29 Factores de carga y de tenacidad hallados para cada presión aplicada

a (mm)	2c (mm)	$P_i = 10 \text{ MPa}$		$P_i = 20 \text{ MPa}$		$P_i = 30 \text{ MPa}$		$P_i = 40 \text{ MPa}$	
		L_r	K_r	L_r	K_r	L_r	K_r	L_r	K_r
0.5	2	0.244	0.012	0.489	0.025	0.734	0.038	0.979	0.050
1	4	0.245	0.018	0.490	0.036	0.735	0.054	0.981	0.072
2	8	0.244	0.026	0.489	0.052	0.733	0.079	0.978	0.105
2.5	10	0.246	0.030	0.492	0.060	0.738	0.090	0.985	0.121
3	12	0.245	0.033	0.491	0.067	0.737	0.101	0.983	0.135
3.48	13.92	0.246	0.037	0.492	0.074	0.738	0.111	0.984	0.148
4	16	0.246	0.040	0.493	0.081	0.739	0.121	0.986	0.162
5.22	20.88	0.248	0.048	0.497	0.096	0.745	0.144	0.994	0.192
6	24	0.249	0.052	0.498	0.104	0.748	0.156	0.997	0.209
6.5	26	0.250	0.055	0.501	0.110	0.751	0.166	1.002	0.221
6.96	27.84	0.251	0.057	0.503	0.115	0.755	0.173	1.007	0.231
8.7	17.4	0.242	0.068	0.485	0.136	0.728	0.204	0.971	0.273

Obtenidos los valores de los factores de tenacidad y carga para cada fisura evaluada y presión aplicada, se realiza la evaluación de la integridad de la tubería fisurada empleando dichos valores en conjunto con el diagrama FAD; en el cual se considera el estado de la tubería aceptable si la intersección de los valores de L_r y K_r se encuentran en la región segura, la cual está delimitada por el diagrama FAD y el valor de L_r igual a uno.

Tomando en cuenta lo descrito se procedió a ubicar los puntos (L_r , K_r) en el diagrama FAD para cada fisura evaluada y presión interna aplicada, obteniéndose el siguiente diagrama.

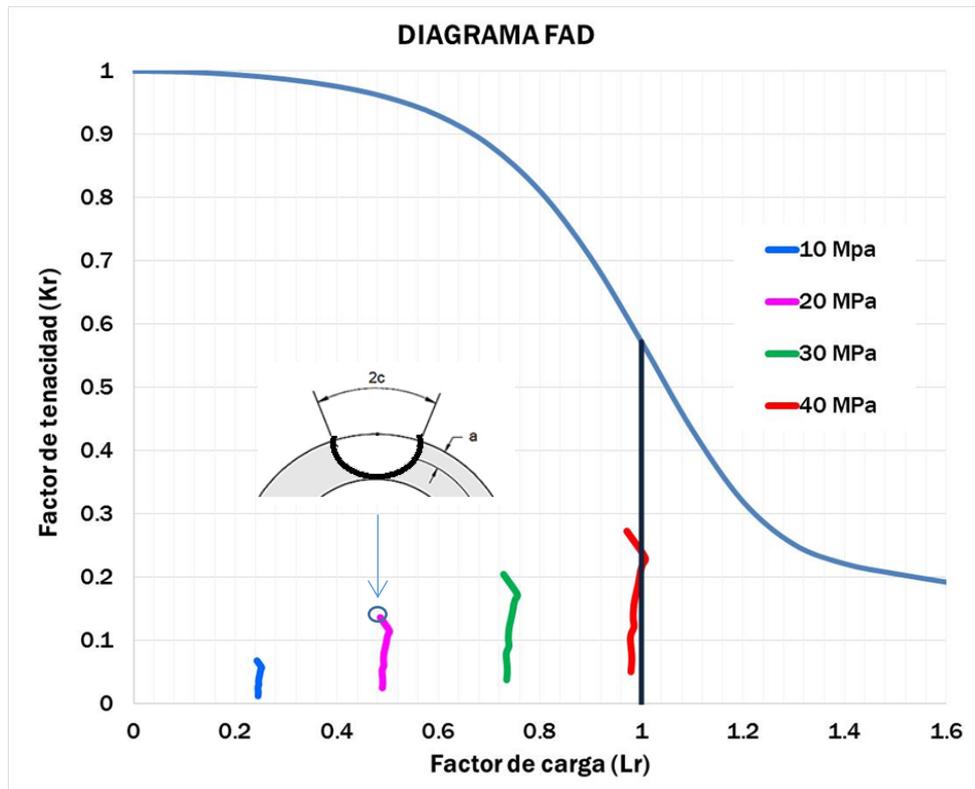


Figura 4. 20 Diagrama FAD

Ubicados en el diagrama FAD todos los estados evaluados se puede observar que ninguno de estos llega a estar fuera de la región apta para el servicio, aun si la profundidad de la fisura llega a ser iguala al espesor de la tubería, como se puede apreciar en la Figura 4.20; siendo este caso el último estado para cada presión interna aplicada y representado la fuga del hidrocarburo antes de producirse la falla.

Empleando el diagrama FAD y ubicando los diferentes estados de la tubería fisurada, se obtuvieron los siguientes diagramas, en las Figuras 4.21, 4.22, 4.23, 4.24, para cada valor de tenacidad del material considerado.

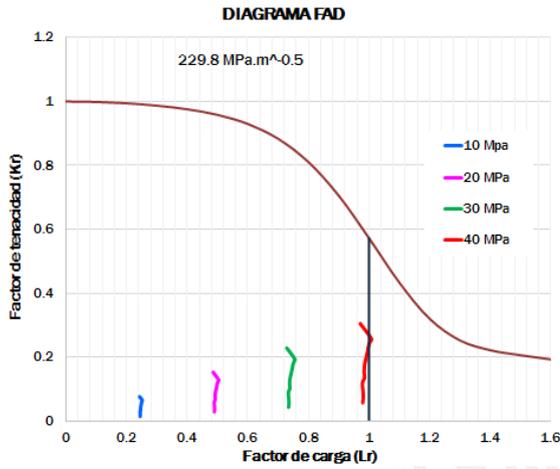


Figura 4. 21 Diagrama FAD
 $K_{IC} = 229.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

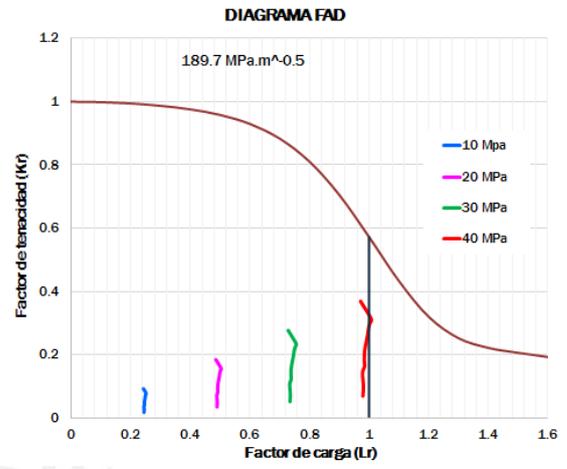


Figura 4. 22 Diagrama FAD
 $K_{IC} = 189.7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

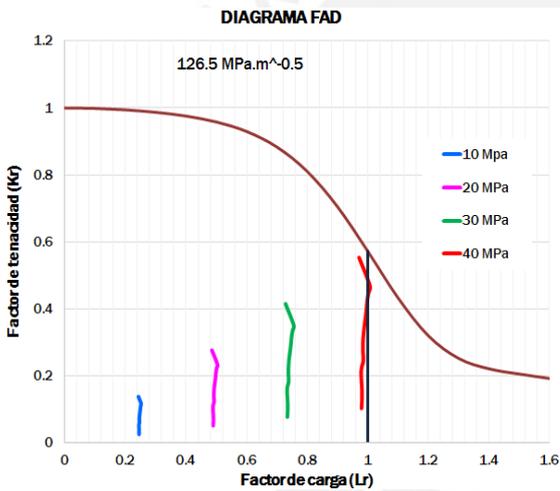


Figura 4. 23 Diagrama FAD
 $K_{IC} = 126.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

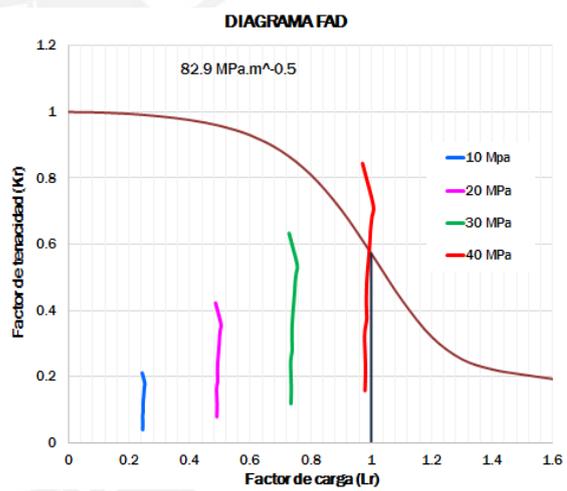


Figura 4. 24 Diagrama FAD
 $K_{IC} = 82.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

CONCLUSIONES

- Después de haber tomado conocimiento de las metodologías y técnicas propuestas por la norma API 579, se implementaron procedimientos para la evaluación de tuberías afectadas por fisuras semi elípticas superficiales orientadas en dirección transversal y longitudinal. Los procedimientos contemplan dos niveles de evaluación, siendo el primero un nivel básico que precisa del empleo de poca información técnica y que no toma en cuenta la presión de operación, el estado de esfuerzos del componente y conceptos teóricos e ingenieriles. Por otro lado, el segundo nivel de evaluación se basa en disciplinas como la resistencia de materiales y la mecánica de la fractura, además emplea el diagrama de falla FAD, el cual es muy útil como herramienta para valorar la integridad estructural y permite reconocer los límites de falla. Por ello, se concluye que la evaluación de un componente de este tipo debería ser sometido como mínimo un nivel 2 de evaluación.
- El parámetro fundamental que caracteriza un componente fisurado es el factor de intensidad de tensiones, dicho factor es obtenido mediante expresiones analíticas propuestas por la norma API 579, sin embargo la misma sugiere que este parámetro podría ser determinado por simulación numérica. Las expresiones analíticas propuestas por la norma dependen de coeficientes dimensionales para configuraciones geométricas específicas, requiriendo en muchas ocasiones la interpolación de una serie de valores. Por lo mencionado, se concluye que la posibilidad de emplear la simulación numérica como una herramienta de análisis propiciaría la obtención de cálculos con mayor rapidez y eficacia.
- La diferencia porcentual entre los valores analíticas y de la simulación arrojan un valor de 9.5%. Los valores del factor de intensidad de tensiones obtenidos mediante simulación por elementos finitos y los valores obtenidos mediante expresiones analíticas de la norma API 579 son comparados, obteniéndose diferencias aceptables, alrededor de 9.5%(máx.) durante la evaluación de una fisura semi elíptica superficial en dirección longitudinal. Por ende, se concluye que el empleo de la simulación para determinar el factor de intensidad de tensiones es factible, permitiendo extender la evaluación de componentes con

diferentes tamaños y formas de fisura, carga y configuraciones geométricas no contempladas en la norma.

- A partir del trabajo realizado por Hector C. Sanzi se reprodujo el caso de estudio de una tubería de reactor (vainas combustible) afectada por fisuras superficiales semi elípticas. Los resultados obtenidos de la evaluación mediante los procedimientos nivel 2 implementados en el capítulo 2, registran una diferencia de 20% respecto a los resultados publicados por Sanzi. Se presume que dicha diferencia se debe a que el autor no toma en consideración factores parciales de seguridad, ya que no son mencionados en su trabajo, que la norma recomienda y que si fueron contemplados en el desarrollo del presente trabajo. Por otro lado, los resultados de la evaluación de la misma tubería mediante los procedimientos nivel 1, también implementados en el capítulo 2, alcanzaron longitudes máximas permisibles de 45 y 40 mm en dirección longitudinal y transversal, respectivamente. Entendiéndose con ello que se es más permisible con el tamaño de fisuras longitudinales, lo cual genera una contradicción ya que si se toma en cuenta la teoría de recipientes a presión de pared delgada se conoce que el valor del esfuerzo tangencial es el doble del esfuerzo longitudinal y por ello la presencia de una fisura longitudinal coloca en una situación de mayor riesgo a la tubería.
- Los resultados de la evaluación de una tubería de 14 in sometida a una presión interna de 10 MPa, diámetro y presión de operación similares al poliducto de Camisea, arrojaron que la tubería alcanzaría la condición de fuga antes de falla. Posteriormente, con la finalidad de contemplar la influencia de la variación de la temperatura en condiciones de servicio y la fragilización por soldadura, se disminuyó gradualmente la tenacidad a la fractura hasta un valor de $82.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (valor mínimo recomendado por la norma); entonces, la tubería tendría que ser sometida a un incremento de 4 veces la presión de operación para alcanzar la condición de falla. Por lo expuesto, se concluye que una tubería no alcanzaría la condición de falla a menos que se contemple otras cargas externas como por ejemplo esfuerzos residuales y el efecto del terreno sobre la tubería.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] SALAZAR, Carlos
2006 *Evaluación de falla en tuberías del proyecto Camisea y soluciones a largo plazo*
- [2] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE
2007 *API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service*
- [3] CICERO GONZALES, Sergio
2007 *Evaluación de la integridad estructural de componentes sometidos a condiciones de bajo confinamiento. Tesis de doctorado en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Cantabria: Universidad de Cantabria, Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales*
- [4] GONZALES VELÁZQUEZ, Jorge Luis
2004 "Fracturas de estructuras". En LIMUSA Y GRUPO NORIEGA (editores). *Mecánica de la Fractura*. México D.F: Limusa, pp 13-29
- [5] ARANA, José Luis
- "Mecánica de Fractura Elástica-Lineal". En LIMUSA Y GRUPO NORIEGA (editores). *Mecánica de la Fractura*. México D.F: Limusa, pp 13-29
- [6] Williams, M.L
1957 "On the Stress Distribution at the Base of Stationary Crack". *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 24, pp. 109-114
- [7] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS
2013 *Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials*
- [8] BRITISH STANDARD
2005 *Fracture mechanics toughness tests. Method for determination of K_{Ic} , critical CTOD and critical J values of metallic materials*
- [9] RUIZ OCEJO, J
1998 *Análisis comparativo de los procedimientos de evaluación de la integridad estructural de componentes fisurados*
- [10] ANDERSON, T.L
2005 *Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications*
- [11] WIRSCHING, P.H
1999 *Incorporation of Structural Reliability methods into Fitness for Service Procedures,*

- [12] SANZI, Hector
1999 Análisis de falla de un tubo contenedor de presión. Evaluación de la integridad estructural mediante técnicas de elementos finitos y ensayos de emisión acústica.
- [13] ROSADO, Belato
1999 Latest developments in mechanical properties and metallurgical features of high strength line pipe steels

