

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**

**EVALUACIÓN DE INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE UN TANQUE  
LIGERO DE GNV APLICANDO SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS  
EN EL MARCO DEL ESTÁNDAR API 579**

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

**LUIS ALEXIS MECHÁN LLONTOP**

**ASESOR: Mg. Herbert Yépez Castillo**

**Lima, Setiembre de 2017**



## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis a mis amigos que siempre confiaron y apoyaron durante el periodo universitario, profesores y asesor, han sido y son un gran apoyo durante el proceso de presentación de tesis.

A mis padres quienes siempre estuvieron pendientes de mí todo el tiempo y a pesar de los altibajos estuvieron ahí para apoyarme y guiarme como persona y profesional.

A mis abuelos quienes nunca dudaron de mi capacidad y aunque ya no estén conmigo siempre serán recordados por darme su apoyo.

Para toda mi familia es esta dedicatoria, pues son quienes me brindan su apoyo incondicional.

## Resumen

En los últimos años, el uso del gas natural vehicular GNV se está incrementado de forma gradual y según la Cámara Peruana de Gas Natural Vehicular (CPGNV), hasta enero de 2016 se han registrado 226 mil unidades que utilizan este combustible aproximadamente. Actualmente, en el país se cuenta con normas técnicas que regulan los requerimientos mínimos de diseño de tanques de GNV, además proporcionan criterios de evaluación para las tareas de inspección de los mismos; sin embargo, dichas normas no contemplan criterios técnicos rigurosos como en otros países, tampoco recomiendan la consulta de algún estándar especializado ante la presencia de algún tipo de defecto en el cilindro durante el periodo de servicio. Por otro lado, en las últimas décadas, han surgido avances notables en diferentes campos de la ingeniería, como es el surgimiento de estándares que determinan la “idoneidad para el servicio” de un componente que presenta algún tipo de defecto sometido a una determinada carga, y el avance tecnológico de las herramientas de simulación que permiten analizar problemas complejos con relativa facilidad. Por lo expuesto, el presente trabajo evalúa la integridad estructural de un tanque de GNV que presenta fisuras semi elípticas, ubicadas sobre la superficie cilíndrica exterior en dirección circunferencial y longitudinal, mediante procedimientos de evaluación recomendados por el estándar API 579 y complementados por simulación numérica mediante el método de los Elementos Finitos. La fisura inicial, con profundidad de 0.4mm y longitud de 1.6mm, no afecta significativamente la integridad del tanque de GNV; sin embargo durante el servicio se propicia el crecimiento de la misma y observa la necesidad de evaluar el momento en que este defecto alcanza dimensiones que lleven al componente a una falla inminente. Al aplicar el procedimiento se obtiene que durante al menos 15 años el tanque no fallará.



**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

TÍTULO EVALUACIÓN DE INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE UN TANQUE LIGERO DE GNV APLICANDO SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS EN EL MARCO DEL ESTÁNDAR API 579.

ÁREA Diseño # 359

PROPUESTO POR Mg. Herbert Yépez Castillo

ASESOR : --Mg. Herbert Yépez Castillo

TESISTA Luis Alexis Mechán Llontop

CÓDIGO 20077100

FECHA 14 de febrero de 2017



**DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:**

En el Perú la introducción de vehículos a gas natural (GNV) se ha constituido en una alternativa atractiva, produciendo un favorable impacto ambiental y económico en la población. Los requerimientos mínimos de diseño y mantenimiento de los tanques vehiculares de almacenamiento de gas natural están establecidos por las normas técnicas peruanas; sin embargo las mismas no contemplan criterios de evaluación en caso estos equipos presenten algún tipo de defecto durante el periodo de servicio. Por otro lado, en las últimas décadas, ha surgido el concepto de *evaluación de la integridad estructural*, que consiste en determinar la idoneidad para el servicio. El estándar API 579 cuenta con procedimientos de evaluación que permiten determinar si un componente puede desempeñarse de forma adecuada ante la presencia de defectos. Por lo expuesto, el presente trabajo evalúa la integridad estructural de un tanque vehicular de GNV mediante procedimientos de evaluación específicos basados en recomendaciones del estándar API 579 y utilizando simulación computacional mediante el método de los Elementos Finitos. A partir de una fisura inicial de forma semi-elíptica, ubicada sobre la superficie cilíndrica en dirección circunferencial y longitudinal, se determina la tolerancia del tanque ante una probable fase activa de crecimiento de la misma.



TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**EVALUACIÓN DE INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE UN TANQUE  
LIGERO DE GNV APLICANDO SIMULACIÓN POR ELEMENTOS  
FINITOS EN EL MARCO DEL ESTÁNDAR API 579**

Introducción

1. Estado del arte
2. Caracterización de fisuras en cilindros presurizados en el marco del estándar API 579.
3. Simulación del mecanismo de fractura en cilindros presurizados.
4. Evaluación de la integridad estructural de un tanque fisurado de GNV.

Conclusiones

Bibliografía

Anexos

Mg. Herbert Yépez Castillo  
Asesor

<b>Índice</b>	
<b>Resumen</b>	<b>II</b>
<b>Índice</b>	<b>V</b>
<b>Lista de símbolos</b>	<b>VIII</b>
<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1. Capítulo 1. Estado del arte</b>	<b>4</b>
1.1. Cilindro de almacenamiento de GNV	5
1.1.1. Diseño de cilindros	9
1.1.2. Fabricación de cilindros GNV-1	12
1.1.3. Inspección de cilindros GNV-1	15
1.1.3.1. Inspección visual externa	16
1.1.3.2. Inspección visual interna	16
1.1.3.3. Inspección por centros autorizados	17
1.2. Evaluación de la integridad estructural	17
1.2.1. Estándares de evaluación de integridad estructural	17
1.2.1.1. ASME BPVC XI	18
1.2.1.2. EDF Energy R5 y R6	18
1.2.1.3. GKSS EFAM	18
1.2.1.4. BS 7910	18
1.2.1.5. FITNET	18
1.2.1.6. API 579	19
1.2.2. Procedimiento de evaluación API 579	20
1.2.2.1. Generalidades del estándar API 579	20
1.2.2.2. Procedimientos para evaluación de un equipo presurizado con fisuras	22
1.2.2.2.1. Nivel 2	24
1.2.2.2.2. Nivel 3	26
1.3. Procedimiento para la evaluación de un cilindro fisurado sometido a presión interna.	27
1.3.1. Método de evaluación Tipo B – Nivel 3	27

<b>2. Capítulo 2. Implementación de un procedimiento de evaluación de integridad de fisuras en cilindros presurizados en el marco del estándar API 579</b>	<b>42</b>
2.1. Caracterización del recipiente	42
2.2. Caracterización de la fisura	42
2.3. Identificación de las condiciones de operación	43
2.4. Determinación del estado de esfuerzos en las inmediaciones de la fisura	44
2.5. Caracterización del material	44
2.6. Determinación de la tenacidad a la fractura del material	45
2.7. Determinación de factores parciales de seguridad	46
2.8. Determinación de esfuerzos de referencia	47
2.9. Determinación del ratio de carga	48
2.10. Determinación de factores de intensidad de tensiones	50
2.11. Determinación del ratio de tenacidad	53
2.12. Diagnóstico empleando diagrama de falla FAD	54
<b>3. Capítulo 3. Simulación del mecanismo de fractura en cilindros presurizados</b>	<b>59</b>
3.1. Identificación de parámetros que pueden ser abordados por simulación numérica	60
3.2. Desarrollo de modelos computacionales	60
3.2.1. Definición de modelos geométricos	60
3.2.2. Discretización de modelos	61
3.2.3. Condiciones de contorno	63
3.2.3.1. Restricciones	63
3.2.3.2. Carga aplicada	63
3.3. Análisis mediante simulación numérica	64
3.4. Comparación empleando resultados analíticos	66
<b>4. Capítulo 4. Evaluación de la integridad estructural de una tanque fisurado de GNV</b>	<b>67</b>
4.1. Caso de estudio: Tanque fisurado de GNV-1	68
4.2. Procedimiento de evaluación: Método B - Nivel 3	68

4.3. Análisis de propagación de la fisura	69
4.3.1. Crecimiento mínimo de la fisura	69
4.3.2. Mínimo número de ciclos	70
4.3.3. Evaluación de la propagación de la fisura empleando el diagrama FAD.	71
4.4. Discusión de los resultados obtenidos empleando criterios de evaluación de la norma peruana	76
<b>Conclusiones</b>	<b>83</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>85</b>





## Lista de símbolos

$a$	: Profundidad de fisura a $90^\circ$ (m)
$c$	: Semi longitud superficial de fisura a $0^\circ$ (m)
$2c$	: Longitud total de fisura superficial (m)
$C_u$	: Factor de conversión para $K_{mat}^{mean}$ en $ksi\sqrt{in}$ y $\sigma_y$ en $ksi$ es 1; para $K_{mat}^{mean}$ en $MPa\sqrt{m}$ y $\sigma_y$ en $MPa$ es 6.275
$R_o$	: Radio exterior de cilindro (m)
$R_i$	: Radio interno de cilindro (m)
$D$	: Diámetro del cilindro (m)
$t$	: Espesor de pared del cilindro (m)
$F$	: Factor de diseño
$R_e$	: Mínimo valor del límite elástico (MPa)
$R_g$	: Mínimo valor de resistencia a la tracción (MPa)
$P_h$	: Presión de seguridad, 1.5 veces la presión de servicio (MPa)
$P_b$	: Presión de diseño para el cilindro (MPa)
$FPS_a$	: Factores parciales de seguridad para dimensiones
$FPS_k$	: Factores parciales de seguridad para factor de tensiones
$FPS_s$	: Factores parciales de seguridad para esfuerzos
$R_{ky}$	: Parámetro que permite obtener los factores parciales de seguridad
$L_r^P$	: Ratio de carga
$L_{r(max)}^P$	: Máximo valor permitido de $L_r^P$
$L_r^{SR}$	: Ratio de carga basado en los esfuerzos residuales
$\sigma_{ref}$	: Esfuerzo de referencia (MPa)

$\sigma_y$	: Esfuerzo de fluencia ( $MPa\sqrt{m}$ )
$K$	: Factor de intensidad de tensiones ( $MPa\sqrt{m}$ )
$K_I^P$	: Factor de intensidad de tensiones basados en esfuerzos primarios ( $MPa\sqrt{m}$ )
$K_I^{SR}$	: Factor de intensidad de tensiones basados en esfuerzos secundarios ( $MPa\sqrt{m}$ )
$K_{mat}$	: Factor de intensidad de tensiones del material ( $MPa\sqrt{m}$ )
$K_{mat}^{mean}$	: Factor de intensidad de tensiones significativo del material ( $MPa\sqrt{m}$ )
$\psi$	: Usado para el factor de corrección de plasticidad $\phi$
$\phi$	: Corrección de plasticidad
$dN$	: Número de ciclos para el mínimo crecimiento de la fisura
$da$	: Variación de tamaño de la fisura (mm)
$C, n$	: Factores para la Ley de Paris

## Introducción

En los últimos años, el uso del gas natural vehicular GNV en el Perú sigue incrementándose y según la Cámara de Peruana de Gas Natural Vehicular (CPGNV), hasta enero del 2016 se ha registrado casi 226 mil unidades activas que utilizan este combustible [1], por ahora, un número muy por debajo de los casos exitosos de Argentina y Brasil, quienes cuentan con 1.9 y 1.6 millones de vehículos que operan con GNV, respectivamente [2]. En el Perú, el cambio de combustible se viene realizando de forma gradual, pues si bien existen casos exitosos como los ya mencionados; también se conoce que el equipamiento de GNV trabaja a altas presiones, alrededor de 200 bar, lo cual implica un alto riesgo con posibles graves consecuencias. Por ello, se entiende que los gobiernos actúan en coordinación con órganos reguladores para evitar incidentes con consecuencias lamentables, como han ocurrido en el país vecino de Bolivia. Las autoridades bolivianas con el objetivo de reducir los accidentes dispusieron que unos 300 mil vehículos, un 23% del parque automotor boliviano, sean sometidos a revisión técnica [3]. En el Perú, los incidentes reportados se deben a las fallas del sistema de transporte de hidrocarburos y hasta la fecha Osinerming no ha registrado accidentes provocados por fallas de tanques de GNV, sin embargo la situación podría cambiar dentro de algunos años, ya que se cuenta con un joven parque automotriz que emplea GNV.

Actualmente los requerimientos de diseño y condiciones de servicio de los tanques de GNV están contemplados en la norma peruana NTP 111.013:2004 – “Cilindro de alta presión para el almacenamiento de gas natural utilizado como combustible para vehículos automotores”, mientras que las revisiones periódicas y los criterios que limitan el funcionamiento de los tanques están contemplados en la norma NTP 111.017:2004 – “Revisión periódica de cilindros tipo I para gas natural vehicular (GNV)”. Los criterios que condenan a un tanque que presenta algún tipo de defecto están resumidos en el anexo G de la norma, los cuales no contemplan cálculos numéricos rigurosos de esfuerzos en las inmediaciones del defecto. Una estría, es un defecto de tipo corte superficial que evidencia la ausencia de material, tiene como tamaño permisible una profundidad de 5% de espesor de pared del tanque. Si este defecto sería modelado como una fisura y analizado mediante procedimientos de evaluación de integridad estructural, se tomaría en cuenta el estado de tensiones, el

tamaño del defecto y el tipo de material del tanque para realizar un diagnóstico basado en la mecánica de la fractura y utilizando diagramas de evaluación de falla.

Por lo expuesto, el presente trabajo de investigación tiene por objetivo evaluar la integridad estructural de un tanque vehicular de GNV mediante procedimientos de evaluación específicos para componentes presurizados que presentan fisuras superficiales recomendados por el estándar API 579 y complementados con la aplicación de la simulación numérica por el método de los Elementos Finitos.

➤ Objetivo general

- Evaluar la integridad estructural de un tanque vehicular de GNV que presenta fisuras semi elípticas, ubicadas sobre la superficie cilíndrica exterior en dirección circunferencial y longitudinal, mediante procedimientos de evaluación recomendados por el estándar API 579 y complementados por simulación numérica mediante el método de los Elementos Finitos.

➤ Objetivos específicos

- Implementar un procedimiento de evaluación para cilindros presurizados basados en el estándar API 579.
- Definir qué parámetros del procedimiento de evaluación pueden ser abordados por simulación numérica.
- Desarrollar modelos computacionales que permitan determinar los parámetros esenciales definidos en el objetivo anterior.
- Comparar los resultados obtenidos por simulación numérica con los resultados obtenidos mediante expresiones analíticas.
- Contrastar los criterios de evaluación de tanques vehiculares de GNV de la norma peruana con los resultados del procedimiento implementado.

Para el cumplimiento de los mencionados objetivos se contará con la siguiente metodología:

- Estudio de los procedimientos de evaluación de integridad estructural de componentes presurizados.
- Implementación de un procedimiento para la evaluación de integridad estructural de cilindros presurizados en el marco del estándar API 579.
- Identificación de los parámetros del procedimiento de evaluación que pueden ser abordados por simulación numérica.
- Definición de la geometría, dimensiones y condiciones de carga y servicio de tanques vehiculares de GNV.
- Desarrollo de modelos computacionales que permitan determinar los parámetros esenciales mediante simulación numérica.
- Análisis y cálculo de métodos analíticos alternativos que se indican en el estándar o por diferentes autores.
- Comparación los resultados obtenidos mediante la simulación por elementos finitos con los resultados a partir de métodos analíticos alternativos.
- Contrastación de criterios de aceptación de tanques dañados de GNV entre la norma peruana y API 579.

## Capítulo 1

### Estado Del Arte

En el Perú, el sector transporte genera el mayor nivel de emisiones contaminantes, por ello la introducción de vehículos a gas natural GNV se ha constituido en una alternativa atractiva, que no solo resulta ser eficiente para combatir la contaminación ambiental, sino también es un medio de transporte económico. Sin embargo, de acuerdo a lo señalado por la Asociación de Grifos y Estaciones de Servicio del Perú (AGESP), en el Perú actualmente se cuenta con un parque vehicular de 2,5 millones de unidades, de las cuales aproximadamente solo 250 mil son a gas, a diferencia de las 226 mil unidades registradas por CPGNV en enero del 2016 [4], aun así, cifras pequeñas si se compara con los casos exitosos de países vecinos, como Argentina y Brasil, quienes ya superan el millón y medio de vehículos a gas.

Por otro lado, las normas técnicas peruanas NPT 111.013 [5] y 111.017 [6] proveen de requerimientos mínimos de diseño e inspección que debe cumplir el tanque de almacenamiento de GNV; sin embargo ambos documentos no contemplan criterios para la evaluación estructural de los equipos durante el período de servicio, ni sugieren la consulta de alguna norma internacional. Cualquier componente mecánico o estructural puesto en servicio es susceptible de experimentar fenómenos de degradación y daño como producto de las condiciones de operación e interacción con el medio que lo rodea. Fenómenos como la fatiga, corrosión, desgaste, entre otros; pueden generar la formación de defectos, disminución de la resistencia mecánica, pérdida de material e inclusive provocar la falla del componente.

En las últimas décadas, ha surgido el concepto de evaluación de la integridad estructural, que consiste en determinar la “idoneidad para el servicio”- *Fitness For Service* - de un componente mientras se encuentra en operación. La evaluación de la integridad estructural contribuye a la toma de decisiones y a la programación de

reparaciones absolutamente necesarias, logrando un equilibrio entre lo económico y la seguridad. Si bien es cierto que, existen avances significativos en este campo, aún existe una falta de difusión de procedimientos de evaluación de la integridad estructural en el medio peruano. Hasta hace algunos años en Europa, no se contaba con un único documento que contemplará metodologías para el análisis de la integridad estructural, sin embargo con la finalidad de conseguir criterios uniformes y globales, se ha elaborado un documento llamado “*FITNET FFS Procedure*” que recoge procedimientos de evaluación de la integridad estructural frente a modos de falla. Por su parte, Estados Unidos cuentan con el estándar API 579, un documento que proporciona procedimientos de análisis de distintos mecanismos de fallo con gran respaldo y aceptación mundial [7].

En el 2007, *American Petroleum Institute* presentó el estándar *API 579 Fitness For Service* [8], el cual provee de recomendaciones para la evaluación de la integridad estructural empleando procedimientos específicos para los diferentes equipos de la industria petroquímica. Los procedimientos de evaluación contenidos en el estándar son actualmente reconocidos y referenciados por otros códigos y estándares como medios adecuados para la evaluación de recipientes bajo presión, sistemas de tuberías y tanques de almacenamiento, donde la inspección ha revelado el deterioro o la presencia de algún defecto en el equipo.

En la actualidad, diferentes investigadores dedicados a la evaluación de la integridad de recipientes a presión publican sus resultados. M. Guerrero [9] y J. Alegre [10] son autores de diferentes artículos que publican sus resultados empleando criterios de evaluación de integridad estructural en recipientes a presión aplicando simulación numérica por el método por elementos finitos. J. Alegre, evalúa la vida útil de un recipiente bajo condiciones cíclicas de trabajo y presenta un procedimiento para determinar el número de ciclos de diseño basados en la mecánica de fractura. Además, proporciona expresiones para determinar el factor de intensidad de tensiones, parámetro que caracteriza el comportamiento de una fisura, facilitando la integración numérica de la ley de propagación, denominada Ley de Paris, la cual evalúa el cambio de tamaño de la fisura durante la operación del componente.

### **Cilindro de almacenamiento de GNV**

El parque automotor peruano experimenta una renovación tecnológica debido a la presencia de nuevas fuentes energéticas como el gas natural vehicular, el cual presenta una fuerte demanda debido a su bajo costo y de acuerdo a los especialistas posee un bajo índice de contaminación. El GNV es un combustible constituido principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) que se obtiene de forma natural y tiene las características de ser limpio, sin color y sin olor. Por otro lado, el uso de GNV requiere un acondicionamiento del sistema de suministro de combustible del vehículo con equipos apropiados, entre los principales se pueden mencionar al tanque o cilindro, válvulas, tubería, variador, electro válvula, mezclador, regulador de presión, manómetro, conmutador e indicador de nivel, como se puede apreciar en la figura 1.1.

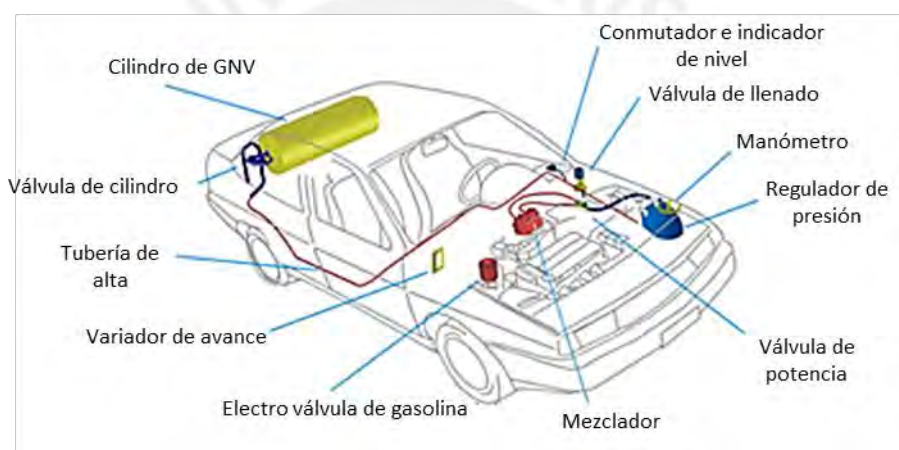


Fig. 1.1. Elementos del sistema del GNV (<http://www.srgas.pe>)

El gas natural comprimido es suministrado por los dispensadores de los grifos a 200 bar (2.9 ksi) es suministrado por los dispensadores de los grifos, el cual es almacenado en el tanque (cilindro), por lo general ubicado en la maletera de vehículo, como se muestra en la figura 1.2. A medida que el gas es consumido la presión de almacenamiento va registrando un descenso, pudiendo llegar hasta 5 Bar, ya que cuando se registra esta presión se considera que el tanque está vacío y es necesario reabastecer de gas al vehículo. El gas fluye desde el tanque hacia el motor por las tuberías de alta presión, pasando por el regulador que reduce la presión hasta alcanzar valores presión de trabajo, y luego por el sistema de inyección controlado por una electroválvula. Finalmente, una mezcla de gas y aire ingresa al sistema de inyección y alcanza las cámaras de combustión permitiendo la combustión necesaria para el accionamiento del motor.





*Fig. 1.2. Ubicación del tanque de GNV*  
 (<http://www.todoautos.com.pe/portal/auto/gnv-glp/2308-gnv-pesado-auto>)

Por otro lado, la regulación del empleo de sistemas de suministro de GNV está establecida por normas técnicas, algunas de ellas basadas en estándares internacionales y su cumplimiento tiene carácter obligatorio. El país se cuenta con Normas Técnicas Peruanas (NTP) que alcanzan regular las actividades de diseño, fabricación e inspección [11], entre las cuales se pueden mencionar las siguientes:

- NTP 111.013:2004 – “Cilindro de alta presión para el almacenamiento de gas natural utilizado como combustible para vehículos automotores”.
- NTP 111.014:2004 – “Componentes del equipo de conversión para vehículos que funcionan con gas natural vehicular”.
- NTP 111.015:2004 – “Montaje de equipos completos en vehículos con gas natural vehicular”.
- NTP 111.016:2004 – “Dispositivos de sujeción para cilindros en vehículos con gas natural vehicular”.
- NTP 111.017:2016 – “Revisión periódica de cilindros tipo I para gas natural vehicular”.

De acuerdo a la NTP 111.013, las condiciones de operación de un cilindro de GNV se basan en exigencias para una correcta combustión y proveer de seguridad a los usuarios. La Tabla 1.1, mostrada a continuación, describe las principales condiciones de operación.

*Tabla 1.1. Condiciones de operación*

Condición	Descripción
Presión máxima	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Presión de operación de 20 MPa (200 bar) a una temperatura de 15°C.</li> <li>○ Presión máxima de llenado 26 MPa.</li> </ul>
Vida de servicio	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ La máxima vida de servicio de 20 años.</li> <li>○ La vida de servicio debe ser especificada por el fabricante y debe estar basada en cumplimiento de las condiciones de operación descritas por la NTP.</li> <li>○ El tiempo de servicio para cilindros metálicos debe estar basado en la tasa de crecimiento de las fisuras por fatiga.</li> <li>○ Inspecciones por ultrasonido u otro método de inspección debe asegurar que el tamaño de fisuras no superen el tamaño permitido.</li> </ul>
Número de ciclos de llenado	Los cilindros deben estar diseñados para ser llenados hasta 1000 veces por año.
Temperatura del gas	Entre -40°C y +65°C.
Superficie externa del cilindro	Debe ser diseñada para resistir al agua, sal, radiación solar, impacto de gravilla, solvente, líquido para motores y gases del tubo de escape.

Por otro lado, la norma NTP 111.013 establece cuatro tipos de cilindros que se diferencian por el material y recubrimiento empleados durante la fabricación. La tabla 1.2 y la figura 1.3, mostradas a continuación, describen y muestran los diferentes tipos de cilindros.

*Tabla 1.2. Tipos de cilindros*

Tipo	Descripción
GNV-1 Cilindro metálico	Cilindro de acero o aluminio íntegramente.
GNV-2 Cilindro con recubrimiento circunferencial	Cilindro interno metálico con recubrimiento de materiales compuestos de resinas o fibras.
GNV-3 Cilindro con recubrimiento	Cilindro interno metálico totalmente impregnado con recubrimiento de materiales compuestos de resinas o

total	fibras.
GNV-4 Cilindro totalmente compuesto	Cilindro no metálico con recubrimiento de materiales compuestos

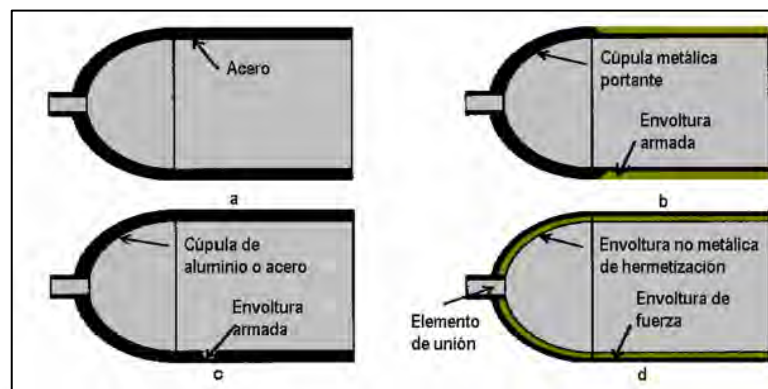


Fig. 1.3. Tipos de cilindros. a) GNV-1. b) GNV-2. c) GNV-3; d) GNV-4 (Pruebas y ensayos en Tanques de GNV – Colegio de Ingenieros del Perú) [5].

Cabe mencionar algunas características funcionales de los diferentes tipos de cilindros, como por ejemplo, el cilindro GNV-2 puede soportar mayores esfuerzos tangenciales que el GNV-1; el cilindro GNV-3, es conformado por un interior metálico más ligero que GNV-1 y GNV-2, alcanza disminuir considerablemente su peso [12]; y GNV-4, conformado de materiales compuestos, posee bajo peso y no es susceptible de presentar corrosión. Finalmente, es preciso resaltar que GNV-1 es el cilindro más empleado por los vehículos del país y se empleará uno de este tipo durante las evaluaciones desarrolladas en el presente trabajo.

### 1.1.1. Diseño de cilindros

De acuerdo a lo indicado por la NTP 111.013, el material de los cilindros GNV-1 puede ser de acero o aluminio. Si el material es de acero, éste tendrá una composición química basada en carbón, manganeso, aluminio y silicio; además de elementos adicionales como cromo, níquel, boro y vanadio entre otros. Azufre y fósforo deben encontrarse en proporciones que no afecten drásticamente el valor de resistencia a la tracción que debe estar en los 950 MPa. Si el cilindro es de aluminio, elementos adicionales como el plomo y bismuto no deben superar un contenido máximo de 0.003%.

Adicionalmente, debido a que los cilindros trabajan a elevadas presiones, la norma NPT.111.013 exige que el diseño del cilindro satisfaga los siguientes requerimientos:

- El diseño debe asegurar el modo de falla “fuga antes de rotura” del cilindro únicamente debido al crecimiento de una grieta por fatiga.
- El cilindro debe ser sometido a una presión de ensayo mínima de 300 bar, 1.5 veces la presión de trabajo.
- La presión mínima de rotura no debe ser inferior a los 450 Bar.

Los estándares internacionales ofrecen recomendaciones técnicas basadas en formulaciones analíticas que no tienen carácter obligatorio como una norma; sin embargo, cuentan con un fuerte respaldo y reconocimiento mundial. A continuación se mencionan los principales estándares de cilindros de GNC (gas natural comprimido):

- ISO 7225:1994 – “Gas Cylinder. Precautionary Labels”
- ISO 9809-1:1999 – “Gas Cylinders. Refillable Seamless Steel. Gas Cylinders. Design, Construction and Testing. Part 1: Quenched and Tempered Steel Cylinders with Tensile Strength less than 1 100 MPa.
- ISO 9809-2:2000 – “Gas Cylinders. Refillable Seamless Steel. Gas Cylinders. Design, Construction and Testing. Part 2: Quenched and Tempered Steel Cylinders with Tensile Strength Greater than 1 100 MPa.
- ISO 9809-3:2000 – “Gas Cylinders. Refillable Seamless Steel. Gas Cylinders. Design Construction and Testing. Part 3: Normalized Steel Cylinders
- ASME – 2001, Rules for construction of pressure vessel-Section VIII, División I.
- IRAM 2526:1997 – “Cilindros de acero sin costura para gases Permanentes”
- ISO 7866:1999 – Gas Cylinders Refillable Seamless Aluminum Alloy Gas Cylinders-Design, Construction and Testing

Las formulaciones analíticas pueden variar entre los estándares debido a los métodos aplicados; sin embargo se obtienen valores similares. A continuación se presentan expresiones extraídas de los estándares ISO 9809-1; ISO 9809-2; ISO 9809-3.

- Expresiones para determinar el espesor del cilindro:

$$a = \frac{D}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{10 \cdot F \cdot R_e - \sqrt{3}}{10 \cdot F}} \right) \quad (1.1)$$

$a$ : Espesor de pared en la zona cilíndrica

$D$ : Diámetro del cilindro

$F$ : Factor de diseño

$R_e$ : Mínimo valor del límite elástico

Donde,

$$F = \text{menor} \left( \frac{0.65}{R_e/R_g}; 0.85 \right)$$

$R_g$ : Mínimo valor de resistencia a la tracción

$$R_e/R_g < 0.9$$

$$a \geq \frac{D}{250} + 1 \quad (1.2)$$

$a = 1.5 \text{ mm}$ , es el mínimo espesor de pared permitido, además debe cumplir con la relación 1.2

$$\frac{P_b}{P_h} \geq 1.6 \quad (1.3)$$

$P_h$ : Presión segura de diseño, se asume generalmente igual a 1.5 veces la presión de servicio.

$P_b$ : Presión de diseño para el cilindro

- Expresiones para determinar el espesor de los extremos convexos

$$b \geq 1,5a \quad \text{Si } 0,40 \geq H/D \geq 0,20 \quad (1.4)$$

$b$ : Espesor de pared en los extremos convexos

$H$ : Altura de domo

$$b \geq a \quad \text{Si } H/D \geq 0,40 \quad (1.5)$$

La relación entre la altura del domo y el diámetro del cilindro nos da una idea de la relación que deberá tener el espesor de pared del domo con el de la zona cilíndrica.

El estándar ISO 9809 presenta 3 secciones que varían por casos, uno mayor a 1100 MPa, Menor a 1100 MPa y casos generales; las expresiones señaladas anteriormente son generales y pueden sufrir variaciones de acuerdo al caso y sección que corresponda. Las variaciones específicas son indicadas explícitamente en cada sección.

Además, se brinda una geometría como modelo para diseñar los cilindros de GNC.

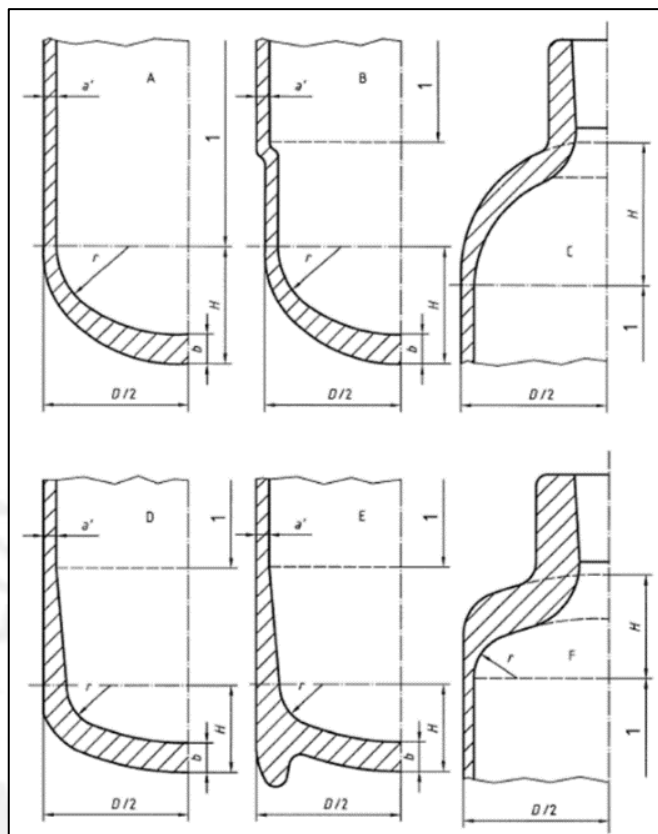


Fig. 1.4. Extremos convexos (ISO 9809-1:1999)

### 1.1.2. Fabricación de cilindros GNV-1

Los proveedores de cilindros de GNV deben cumplir con las recomendaciones de estándares internacionales y de las normas que exija el respectivo país donde se comercialice dichos cilindros. En el Perú, la norma NTP – 111.013 de diseño exige que los cilindros comerciales cumplan los siguientes requerimientos:

- Espesor de pared entre 6 a 10 mm
- Presión de trabajo 200 bar y probados a 300 bar
- Capacidad de almacenamiento entre 6 a 25 m<sup>3</sup> a 200 bar de presión de trabajo, esto tomando en cuenta la presión de carga del grifo.
- Cierre rotacional en caliente, conformado por forja o por embutido

Las marcas proveedoras en Perú son extranjeras y fabrican los cilindros basados en estándares internacionales, tales como ISO, respetando las normas de sus países. El proceso de fabricación es muy parecido entre las diferentes empresas, salvo algunas variaciones dependiendo del tipo de cilindro. A continuación se describe los procesos empleados por la mayoría de las fabricaciones.

El proceso de fabricación inicia con la habilitación de tubos de acero sin costura totalmente exento de soldadura; los tubos pasan por el siguiente proceso: laminación, para mejorar la relación espesor volumen; corte, para definir tamaños; conformación, el principal caso es el proceso de cierre por medio de revoluciones a altas temperaturas; el cual puede, dependiendo del material y de la temperatura del proceso, puede tomarse como un temple, normalizado, retorno de acuerdo de cada tipo de cilindro (las temperaturas varían de acuerdo a la geometría, materia y espesor); fabricación, incluye todos los procesos de mecanizado; finalmente la pintura, en esta los cilindros son pintados en patrones que ayudan a diferenciar el lote al momento de iniciar las pruebas para certificar su calidad. En la figura 1.5 se detallan de manera gráfica el proceso de fabricación completo; en el cual no se adentrará por no pertenecer al alcance del presente trabajo.

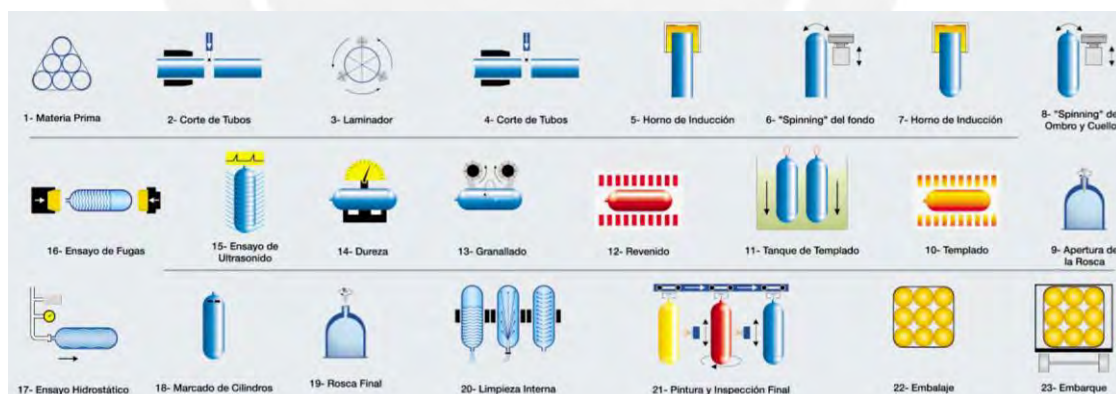


Fig. 1.5. Proceso de fabricación de cilindros a presión (<http://www.cilbras.com.br>).

El sellado de los extremos del cilindro se realiza mediante conformado en caliente llamado, denominado "spun", que se caracteriza por ser un proceso de sellado giratorio al calor, como lo ilustra la figura 1.6. Luego de sellar ambos extremos, el componente pasa por un proceso de revenido y posteriormente se practica un tratamiento térmico de templado con la finalidad de alcanzar los valores de dureza requeridos por el diseño. Adicionalmente, cabe señalar que en la actualidad las empresas de fabricación emplean la simulación numérica por el método de elementos

finitos durante sus actividades de diseño con el objetivo de mejorar el desempeño de sus productos, como se observa en la figura 1.7. [13].



Fig. 1.6. Proceso de conformado en caliente (<http://www.cilbras.com.br>).



Fig. 1.7 – Simulación de un cilindro de GNV para mejorar su desempeño (<http://www.cilbras.com.br>).

Las normas peruanas no indican el proceso de fabricación, sin embargo señalan algunas recomendaciones que los cilindros deben cumplir. A continuación se describen algunas recomendaciones estipuladas por la norma NTP 111.013.

- **Sellado.**

Antes de proceder con el sellado definitivo se debe examinar el espesor de pared y el acabado superficial del cilindro. Los cilindros de aluminio no deben ser sellados por un proceso de conformado, mientras que los cilindros de acero sellados por conformado, deben ser inspeccionados por ensayos no destructivos. No se debe agregar metal en el proceso de cierre de los extremos.

- **Tratamiento térmico**



Después del proceso de sellado de los extremos, los cilindros deben ser tratados térmicamente para obtener la dureza determinada en el diseño.

- *Protección externa*

El recubrimiento debe cumplir las siguientes condiciones: acabado superficial que ofrezca suficiente protección, un adecuado recubrimiento protector y cubierta impermeable a químicos.

### 1.1.3. Inspección de cilindros GNV-1

El propósito de las inspecciones es lograr un nivel de confiabilidad aceptable para que el cilindro pueda continuar en servicio durante otro período. La evaluación permite encontrar posibles defectos que podrían ocasionar algún tipo de falla. La Tabla 1.4 describe los defectos reconocidos por la norma.

*Tabla 1.4. Defectos y definiciones (Anexo F de la NTP 111.013)*

Defecto	Definición
Abolladura	Depresión o cavidad en la superficie del cilindro, pero que no afecta el espesor de las paredes.
Abolladura conteniendo estrías	Es una depresión o cavidad que contiene estrías.
Canal de corrosión	Forma más concentrada de la línea de corrosión, puede ser interna o externa.
Corrosión generalizada	Zona amplia atacada por la corrosión con grado de ataque variable.
Corrosión local	Causa reducción de espesor en una zona pequeña, externa o interna que no incluye otros tipos de corrosión.
Corrosión en línea	Conjunto de picaduras, cercanas entre si y agrupadas de forma lineal, faja o banda continua.
Corrosión por picadura	Corrosión en una zona muy pequeña o cavidad aproximadamente circular y de profundidad variable (externa o interna).
Daño por fuego	Calentamiento excesivo, general o localizado.
Desgaste del cuerpo cilíndrico	Remoción del material como resultado del movimiento relativo del cilindro con respecto a su anclaje u otros elementos.
Estría	Raya o corte con falta de material en la superficie del cilindro,

	que disminuye el espesor de las paredes.
Fisura	Grieta interna o superficial.
Globo	Saliente o protuberancia permanente en la superficie del cilindro, consecuencia de una presión defectuosa o fallas de fabricación.
Laminación	Defecto que aparece como grieta o desgarramiento debido a materia prima defectuosa o a fallas en la fabricación.
Ovalización	Deformación o aplastamiento del cilindro que afecta su simetría.
Pliegue	Defecto de la fabricación que puede propagarse bajo la acción o la corrosión.

La norma peruana señala de carácter obligatorio realizar revisiones quinquenales a partir de la fecha de fabricación del cilindro. A continuación se describen las etapas más importantes de la revisión periódica obligatoria.

#### **1.1.3.1. Inspección visual externa**

Después de una adecuada limpieza del componente, el inspector procederá de forma detallista a evaluar los principales defectos indicados, sin embargo su experiencia podría ayudar a distinguir un defecto no contemplado en la tabla 1.4 o en anexo F de la norma.

#### **1.1.3.2. Inspección visual interna**

Una vez realizada los procedimientos de limpieza, se debe aplicar una sonda luminosa que permita identificar defectos. De mostrar señales de corrosión interna, se deberá proceder a limpiar la zona con métodos que no aporten una temperatura mayor de 300°C, para evitar dañar el cilindro.

#### **1.1.3.3. Inspección por centros autorizados.**

La inspección debe ser realizada por centros autorizados que cumplan con lo estipulado en la Directiva N° 004-2010-MTC/15 “*Régimen de autorización y funcionamiento de los centros de revisión periódica de cilindros*” [14]. Según INFOGAS, entidad que administra el sistema de control de carga de GNV, el Perú cuenta con cuatro centros de revisión periódica de cilindros: TECIGAS, CILTEST, HIPER FAST y HERSA, los

cuales realizan las actividades de inspección basados en las directrices de la NTP 111.017 y ofrecen inspecciones básicas anuales o a solicitud de sus clientes. La condena de un cilindro queda a criterio de los ingenieros o técnicos acreditados de estos centros, sin embargo se considera que los criterios que se emplean podrían ser más confiables si se realizará una evaluación integral del componente que permita contemplar condiciones reales empleando métodos y técnicas avanzadas en el campo de la ingeniería.

### **Evaluación de la integridad estructural**

La ingeniería a lo largo de la historia ha evolucionado motivada por la búsqueda de satisfacer necesidades humanas; sin embargo accidentes memorables como el de los aviones COMET en 1953 y 1954 o de los Barcos Liberty durante la segunda guerra mundial fueron motivo para que la ingeniería desarrolle e incursione en nuevas disciplinas que estudien la integridad estructural de los componentes [15].

En las últimas décadas, ha surgido el concepto de evaluación de la integridad estructural, que consiste en realizar el análisis de un componente para demostrar la idoneidad para el servicio, *Fitness For Service*. Dicho análisis contribuye a la toma de decisiones y a la programación de reparaciones absolutamente necesarias, fomentando un buen equilibrio entre la parte económica y la de seguridad. Sucede que mientras que Europa y Estados Unidos han tenido avances significativos en este campo, en el medio peruano aún hay una falta de conocimiento del tema.

#### **1.2.1. Estándares de evaluación de integridad estructural**

A continuación se describen algunos de los estándares que proponen procedimientos de evaluación de la integridad estructural de componentes metálicos.

##### **1.2.1.1. ASME BPVC XI**

“Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC)” es un procedimiento que forma parte de los estándares ASME y su alcance contempla la evaluación de calderas y recipientes a presión de la industria nuclear. Además, la evaluación propone el desarrollo de un programa obligatorio de revisiones periódicas que permita caracterizar defectos encontrados [16].

### 1.2.1.2. EDF Energy R5 y R6

EDF Energy es un procedimiento de evaluación creado por un destacado proveedor de electricidad en el Reino Unido utilizados en la industria de la generación de energía. A continuación se describe el alcance de los procedimientos R5 y R6.

- *Procedimiento de evaluación de la respuesta de las estructuras sometidas a altas temperaturas (R5)*

Tal como indica su nombre, el procedimiento R5 se centra en evaluar estructuras sometidas a altas temperatura para evitar la zona de plastificación. Los modos de falla evaluados son: excesiva deformación inelástica, crecimiento gradual o inestable, ruptura por acumulación de daños creep, fisuración por creep y fatiga, falla de soldadura disímil [17].

- *Evaluación de las estructuras que contienen defectos (R6).*

Este procedimiento evalúa estructuras con defectos que se encuentran sometidas a cargas de operación como residual, térmica y mecánica, basado en diagramas de fallo. Una característica resaltante del procedimiento es su claridad y facilidad de uso [18].

### 1.2.1.3. GKSS EFAM

“Engineering Flaw Assesment Method” (EFAM) es un procedimiento desarrollado en Alemania que propone métodos integrales de evaluación de componentes agrietados en condiciones finales de ruptura y está conformado por dos sub procedimientos: GTP y ETM.

- EFAM GTP – Procedimiento de ensayo para la determinación del comportamiento de los materiales a la fractura. Se realiza la evaluación de probetas pre-fisuradas para determinar la resistencia a la fractura de los materiales mediante tasa de disipación de energía [19].
- EFAM ETM – Procedimiento que evalúa la presencia de defectos en estructuras de ingeniería y se realiza en términos de la Integral J, un parámetro que caracteriza el comportamiento de la fisura [20].

#### 1.2.1.4. BS 7910

El procedimiento BS 7910, inicialmente conocido como PD 6493, forma parte de los estándares británicos que evalúa la presencia de defectos en las inmediaciones de las uniones soldadas.

#### 1.2.1.5. FITNET

Debido a la necesidad de satisfacer criterios de uniformidad y globalización, la Comunidad Europea ha elaborado un documento, denominado “*FITNET FFS Procedure*”, que recoge procedimientos de evaluación de la integridad estructural para la prevención de fallas durante servicio ocasionadas por mecanismos de fractura, fatiga, fluencia y corrosión. El siguiente cuadro esquematiza el procedimiento de evaluación del FITNET.

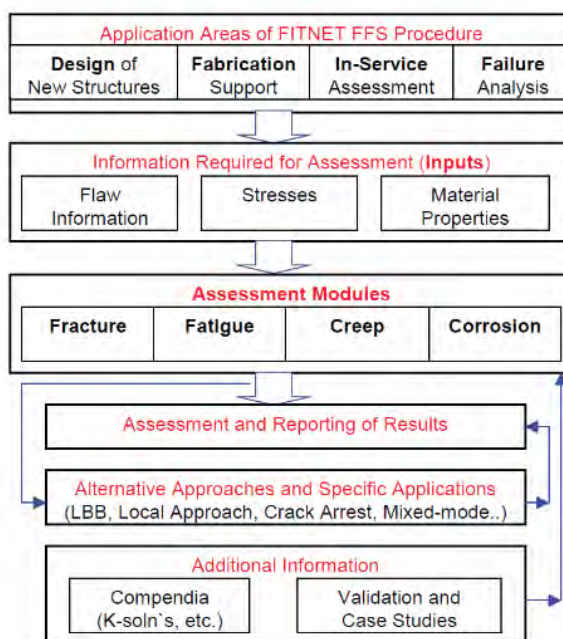


Fig. 1.8. Cuadro de desarrollo del procedimiento de FITNET FFS [21]

#### 1.2.1.6. API 579

El estándar API 579 FFS cuenta con procedimientos de evaluación de tanques y recipientes a presión que permiten estimar la relativa tolerancia ante la presencia de defectos y cuantificar el riesgo de falla de estos equipos. Para ello, el estándar define tres niveles de evaluación que dependen de la cantidad de la información técnica, las capacidades del personal evaluador y la complejidad del análisis. El Nivel 1 consiste

en un análisis de tipo conservador con un mínimo de información técnica disponible. La evaluación requiere de un conocimiento básico del componente fisurado, el cual puede ser una placa plana, un cilindro o una esfera, y la carga sobre el componente es la presión que produce únicamente esfuerzos de membrana. En el Nivel 2, la evaluación requiere de métodos y técnicas analíticas basados en la mecánica de la fractura y la resistencia de materiales. Finalmente, el Nivel 3 exige información detallada del caso a analizar y se recomienda el empleo de técnicas avanzadas para el cálculo de esfuerzos por ingenieros especialistas. Dichas técnicas pueden estar basadas en métodos numéricos, como los Elementos Finitos. Además, el nivel 3 evalúa fisuras en una fase activa de crecimiento sub crítico o que presenten señales de una potencial activación debido a las condiciones de carga, como por ejemplo fuerzas variables.

### 1.2.2. Procedimientos de evaluación API 579

La ubicación del tanque de GNV hace necesaria realizar una evaluación que otorgue precisión y seguridad, pues al encontrarse dentro de los vehículos, un mal discernimiento del estado actual de un cilindro puede causar severos daños. Por lo expuesto, los estándares que pueden ser empleados para la evaluación son API 579 y *FITNET*. Ambos presentan técnicas y métodos rigurosos de evaluación de la integridad de componentes a presión, pero de tener que realizar una elección, el estándar API 579, cuenta con una fuerte aceptación en la industria petroquímica, lo cual lo vuelve altamente confiable.

#### 1.2.2.1. Generalidades del estándar API 579

Este estándar proporciona un detallado proceso de evaluación dependiendo del tipo de defecto y de los mecanismos de daño, permitiendo inclusive ciertas combinaciones, en la tabla 1.5 se indican los defectos a evaluar en cada sección del estándar y una explicación de la misma.

*Tabla 1.5 – Descripción general de los defectos y mecanismos de daño*

Defectos y mecanismos de daño	Parte	Descripción general
Fractura frágil	Parte 3	Es un procedimiento para evaluar la resistencia a la fractura frágil de componentes como vasijas presurizadas, tuberías y tanques de almacenamiento fabricados con aceros al carbono o

		de baja aleación de acero. Evalúa a condiciones normales de operación, arranque, apagado y modificación de condiciones.
Pérdida general de metal	Parte 4	Es un proceso para evaluar corrosión generalizada. Los datos de los espesores pueden ser los obtenidos por medición o los estándares normalizados de espesores.
Pérdida de material localizada	Parte 5	El procedimiento evalúa puntualmente y las ramificaciones de las áreas delgadas y su crecimiento en componentes presurizados.
Picaduras por corrosión	Parte 6	Son procedimientos para evaluar picaduras dispersas, picaduras localizadas, picaduras dentro de una región con pérdida de material, y una región con pérdida de material dentro de una zona de picaduras dispersas.
Ampollas y daños por HIC/SOHIC	Parte 7	Evalúa de forma aislada las ramificaciones de ampollas y daño por HIC/SOHIC (agrietamiento inducido por hidrogeno/ esfuerzos orientados por el agrietamiento inducido por hidrogeno). Evalúan juntas soldadas, discontinuidades estructurales como anillos de refuerzos, transición de casco o boquillas.
Desalineamiento de soldadura, distorsiones del casco	Parte 8	Se evalúa el esfuerzo causado por discontinuidades geométricas en cascos estructurales incluyendo el desalineamiento de estas.
Defectos como agrietamiento	Parte 9	Evalúa las grietas como defectos, evaluando el factor de intensidad de tensiones y esfuerzo de referencia; además de los esfuerzos residuales, y entrega recomendaciones para evaluar el crecimiento de la grieta.
Altas temperaturas de operación y Creep	Parte 10	Evalúa la vida remanente de un componente que opera en régimen de Creep.
Daño por fuego	Parte 11	Evalúa equipos sujetos a daño por fuego, proporciona un rango para evaluación basado en la experiencia de la exposición durante el fuego.
Abolladura, estrías, y abolladura con estrías combinadas	Parte 12	Proporciona una guía para evaluar abolladura, estrías, y abolladura con estrías combinadas.
Laminación	Parte 13	Es un guía para evaluar laminaciones en juntas soldadas y estructurales, discontinuidades como transición de carcasa, anillos de refuerzos y boquillas.

Cada procedimiento desarrollado en las partes mencionadas emplean requerimientos diferentes y dependiendo de ello puede obtenerse una evaluación más exacta o conservadora. En algunos casos, dependiendo del daño, defecto, condiciones de operación, variantes de esfuerzos, es posible emplear uno o más procedimientos descritos en diferentes partes del estándar. En la figura 1.9 se muestra la clasificación de los procedimientos de evaluación de acuerdo a los cinco diferentes tipos o mecanismos de daño: fractura frágil, corrosión/erosión, fisuración, daño por fuego, “creep”, daño mecánico.

Una vez definido el tipo de defecto a analizar y seleccionado el procedimiento, éste requiere una serie de datos y características del defecto; sin embargo, esta información pueden ser mínima o detallada dependiendo del nivel de confiabilidad que se requiera obtener. El estándar propone tres niveles de evaluación, siendo el nivel 1 el más conservador que exige información básica; el Nivel 2 riguroso ya que emplea principios de la mecánica de la fractura; y el Nivel 3, que exige una evaluación más profunda con información experimental, inclusive propone el uso de software de simulación.

#### **1.2.2.2. Procedimientos para evaluación de un equipo presurizado con fisuras**

La sección nueve del estándar API 579 está dedicada a evaluar grietas, que son considerados como defectos planos de ángulo agudo de su raíz y caracterizados por su longitud y profundidad. Su presencia puede deberse a varias causas, como el proceso de fabricación, el medio ambiente, algún mecanismo de daño o la combinación de estos, y de acuerdo al estándar, se debe evaluar la presencia de un estado potencial de crecimiento. En caso no haya evidencias de un posible crecimiento se debe recurrir a métodos que impidan que este estado cambie. Por el contrario, en caso se constate un posible crecimiento, se deberá evaluar el comportamiento de la fisura y determinar el tiempo que le tomará a la fisura alcanzar un tamaño crítico.

La evaluación de la integridad estructural de un componente fisurado puede ser realizada bajo tres diferentes niveles de confiabilidad. Cada nivel posee sus propios requerimientos y su rigurosidad depende de la información con la que se cuenta y de la destreza de los examinadores. A continuación se describen brevemente los niveles 2 y 3; los cuales contienen al nivel 1 como recolección de datos inicial.



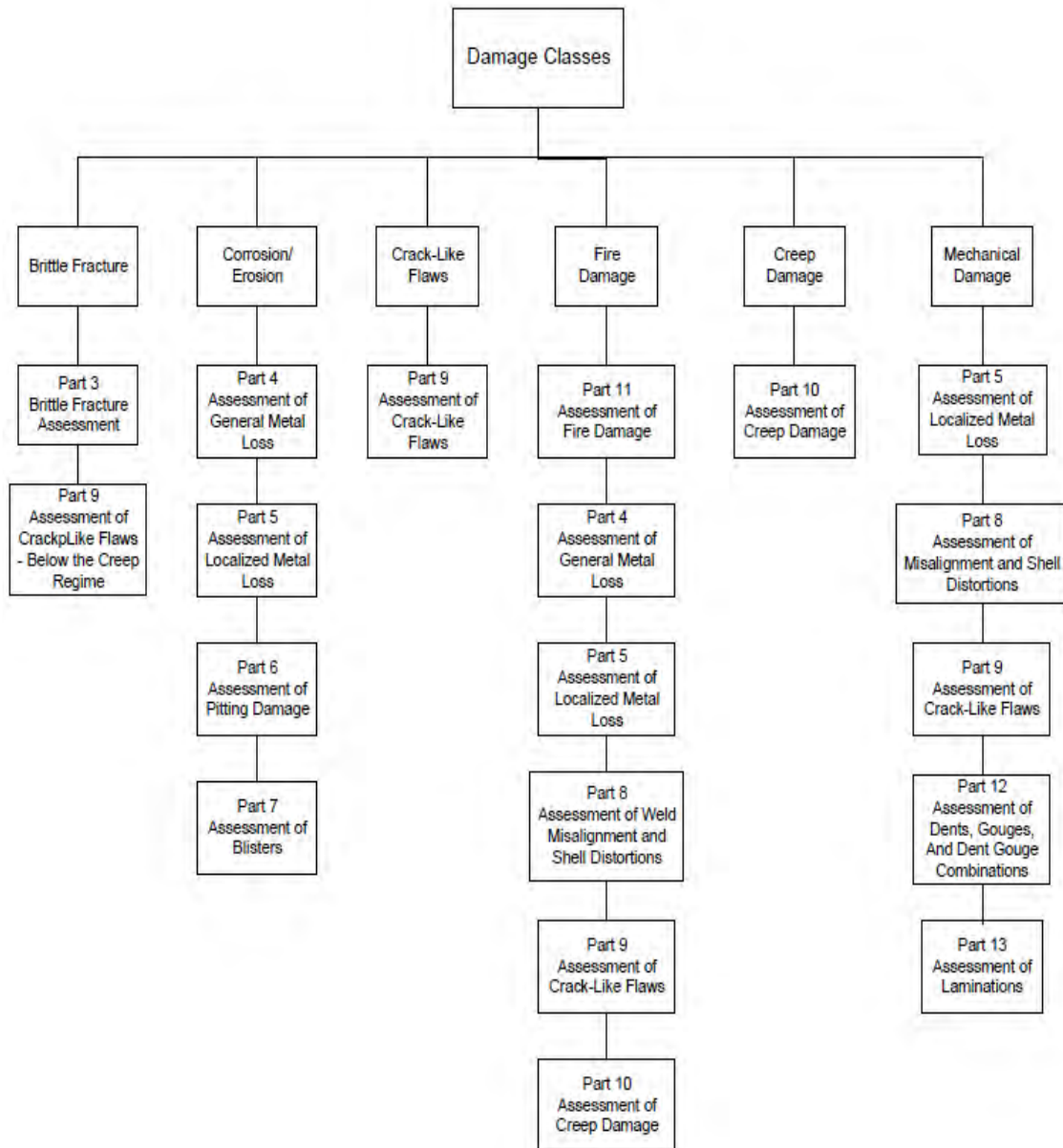


Fig. 1.9. Procedimientos agrupados por clase de daño –“API 579”

#### 1.2.2.2.1 Nivel 2

El nivel 2 es una evaluación basada en principios de la resistencia de materiales y la mecánica de la fractura. La evaluación propone un procedimiento para determinar parámetros esenciales como esfuerzos principales, esfuerzos de referencia, tenacidad a la fractura, entre otros, y permiten mediante un diagrama de falla, *Failure Assessment Diagram FAD*, diagnosticar si el componente puede seguir operando a pesar de la presencia de la fisura. Ver figura 1.11.

Las variables ubicadas en la abscisa y ordenada del diagrama FAD son el ratio de tenacidad a la fractura y el ratio de carga, respectivamente. El ratio de tenacidad mide la resistencia del material a la fractura tomando en consideración los valores de tenacidad a la fractura generados por la presencia de la fisura y el ratio de carga, considera la carga aplicado sobre el componente y el límite admisible del material. Asimismo, el diagrama FAD define una curva límite, la cual se determina a partir del comportamiento esfuerzos-deformación del material. Dicha curva delimita dos regiones, una región bajo la curva que indica que el componente evaluado presenta tolerancia ante la presencia de la fisura y que podría seguir operando, y la otra, por encima de la curva que indica la posibilidad inminente de falla del componente. El empleo del diagrama FAD permite poseer una herramienta que contribuya a tomar decisiones y determinar si un componente puede continuar en operación o debe ser sustituido o reparado de forma inmediata.

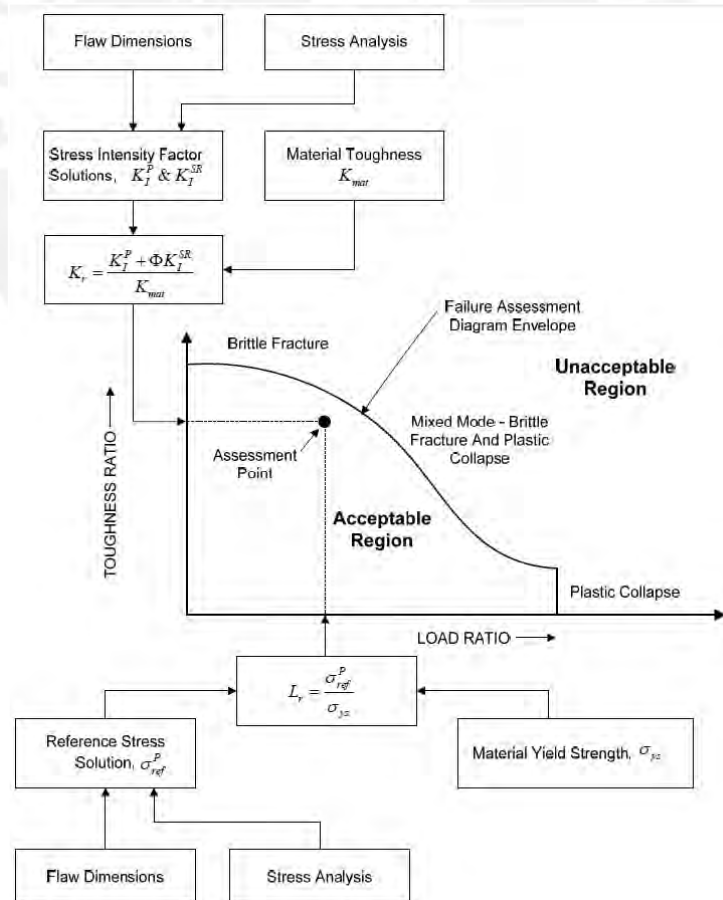


Fig. 1.11 – Failure Assessment Diagram – “FAD”

El empleo del diagrama FAD bajo el Nivel 2 presenta algunas restricciones que son descritas a continuación:

- Los componentes deben poseer geometrías típicas de recipientes presurizados, tales como cilindros y esferas.
- La ubicación de las fisuras han sido estudiadas para ciertas regiones y la forma de las mismas son definidas como geometrías conocidas.
- La curva de falla es obtenida de una expresión analítica que no consideran las propiedades del material.
- No se contempla la evaluación del efecto de la propagación de la fisura y tampoco la presencia de cargas fluctuantes.

#### **1.2.2.2 Nivel 3**

El Nivel 3 es el nivel más escrupuloso y exige información detallada del caso a analizar, además recomienda el empleo de técnicas avanzadas por ingenieros especialistas para el cálculo de esfuerzos. Dentro de las técnicas que se pueden emplear son aquellas basadas en métodos numéricos, como los Elementos Finitos. A diferencia del Nivel 2, el Nivel 3 evalúa fisuras en una fase activa de crecimiento o que presenten señales de una potencial activación debido a las condiciones variables de carga. El Nivel 3 emplea cinco métodos, los cuales son descritos a continuación:

##### **a. Método A**

Básicamente es reproducir el procedimiento indicado en el Nivel 2, excepto que la designación de una serie de parámetros, denominados factores parciales de seguridad, queda a criterio de la persona que realiza la evaluación.

##### **b. Método B**

Este método también basado en el procedimiento del Nivel 2, define la curva de falla del diagrama FAD a partir de valores reales del comportamiento esfuerzo-deformación del material, los cuales son obtenidos mediante ensayos de laboratorio.

**c. Método C**

La obtención de la curva de falla se logra a partir de información de las cargas de trabajo, geometría y material del componente. Además, el método incluye análisis elasto-plástico similar al código R6.

**d. Método D**

Realiza la evaluación de un componente cuando se presenta desgarramiento dúctil.

**e. Método E**

Permite la aplicación y/o convalidación de otros códigos de evaluación como BS 7910, Nuclear Electric R-6, WES 2805-1997, entre otros.

**Procedimiento para la evaluación de un cilindro fisurado sometido a presión interna.**

Dentro de la variedad de casos de estudio que son contemplados por el estándar API 579, los procedimientos para evaluar la integridad de un componente cilíndrico sometido a presión interna que presenta una fisura superficial son de interés para el presente trabajo. Los procedimientos propuestos por el estándar API 579 están consignados en el capítulo 9, "*Assessment Of Crack-Like Flaws*", el cual contempla el procedimiento general y sugiere revisar los anexos C y F para recabar información de las expresiones analíticas para determinar el factor de intensidad de tensiones de la fisura y de las propiedades de resistencia a la fractura del material, respectivamente.

El procedimiento empleado para el estudio en el presente trabajo está basado en el Nivel 3 - Método B. Como ya fue mencionado, API 579 propone tres niveles de confiabilidad que dependen de la información disponible de las condiciones de servicio, la experiencia del evaluador y conocimiento de disciplinas como la resistencia de materiales y la mecánica de fractura. En ese sentido, se cuenta con la información requerida y el conocimiento técnico suficientes exigidos por el nivel más alto de confiabilidad.

A continuación se describe las consideraciones técnicas que el Nivel 3 - Método B exige para la evaluación de la integridad estructural de un componente cilíndrico bajo presión interna que presenta una fisura superficial.

### **1.3.1. Método de evaluación Tipo B – Nivel 3**

Método que tiene como objetivo principal realizar la evaluación de integridad mediante el diagrama de fallo FAD y el empleo de una curva de falla obtenida a partir de valores reales del comportamiento esfuerzo-deformación del material, los cuales son obtenidos mediante ensayos de laboratorio. A continuación, se describe brevemente el procedimiento propuesto por el método B del estándar API 579, el cual será implementado en el capítulo 2 contemplando las particularidades del caso.

- ***Caracterización del recipiente***

La caracterización del recipiente contempla la recopilación de información básica de componente en estudio, dentro de las principales se pueden mencionar: geometría, dimensiones, existencia de juntas soldadas u otros detalles constructivos que deban ser incluidos en la evaluación.

- ***Caracterización de la fisura***

Se identifican las características geométricas de la fisura, así como su ubicación en el componente. Las fisuras superficiales reales poseen formas irregulares, así que debe ser definida empleando geometrías conocidas. La figura 1.12.a muestra la forma de una fisura real, mientras que la figura 1.12.b, la idealización de la fisura como una superficie semi elíptica. Las dimensiones que caracterizan a una fisura semi elíptica superficial son su longitud " $2c$ " y profundidad " $a$ ", como se aprecia en las figuras 1.12-1.14.

Acerca de la ubicación de la fisura se establece dos posibilidades orientaciones: longitudinal y circunferencial. La fisura longitudinal es aquella cuya superficie (área de la fisura) es paralela al eje del cilindro, mientras que la fisura circunferencial es aquella cuya superficie es perpendicular al eje del cilindro, tal cual se observa en las figuras 1.13 y 1.14, respectivamente.

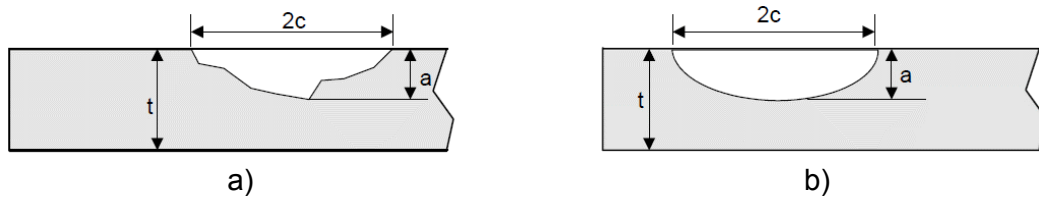


Fig. 1.12. a) Fisura superficial real. b) Fisura semi elíptica idealizada. (API 579 - Fig. 9.1)

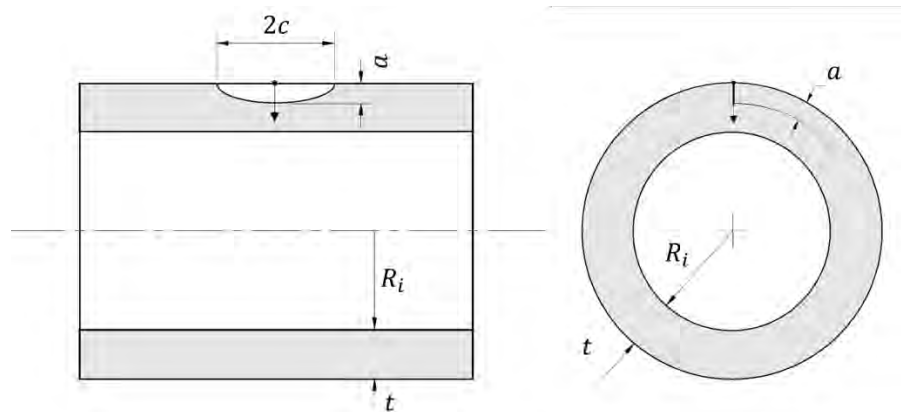


Fig. 1.13. Fisura semi elíptica superficial orientada longitudinalmente (API 579).

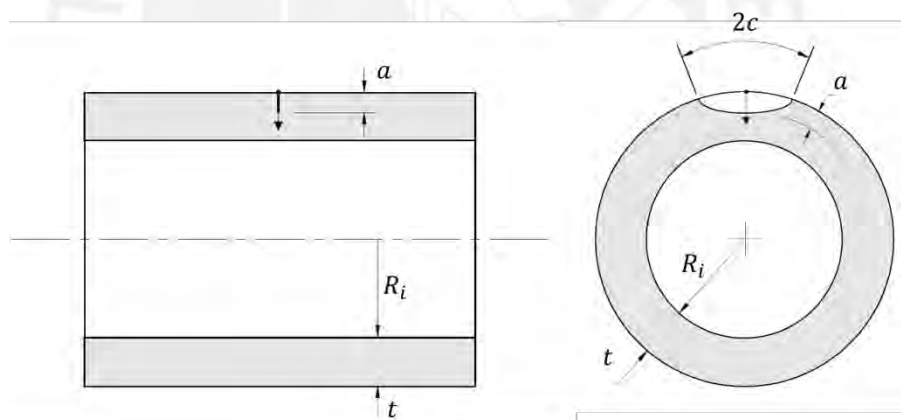


Fig. 1.14. Fisura semi elíptica superficial orientada circunferencialmente (API 579).

- **Identificación de las condiciones de operación**

Se debe determinar las condiciones más reales de operación del componente como son la combinación de cargas, el medio (agresivo o no) y la temperatura de servicio. Cabe señalar que el Método B – Nivel 3 no contempla temperaturas de operación que se encuentran en rango de “creep”.

- **Determinación del estado de esfuerzos en las inmediaciones de la fisura**

Los esfuerzos pueden ser clasificados en primarios, secundarios y residuales.

- Esfuerzos primarios – Esfuerzos que se desarrollan para generar el equilibrio a las cargas impuestas.
- Esfuerzos secundarios – Esfuerzos de menor importancia que se desarrollan por restricciones de partes adyacentes.
- Esfuerzos residuales – Esfuerzos que son resultado de la soldadura y deben ser evaluadas.

En el caso de los cilindros presurizados, los esfuerzos principales son aquellos que se desarrollan producto de la presión interna, siendo está la carga principal de interés. Se desestima esfuerzos generados por cargas secundarias, ya que los tanques de GNV, objeto de estudio, operan prácticamente apoyados en la base de la maletera del vehículo y sus dispositivos de sujeción no generan cargas significativas. Asimismo, el estudio no contempla esfuerzos residuales debido a que los tanques de GNV son fabricados sin el empleo de soldadura.

La presión interna identificada como carga principal genera los esfuerzos primarios en la pared del cilindro. Ahora, es posible estudiar los cilindros de una manera simple siempre que cumplan la condición de pared delgada, la cual implica que la relación de radio interior y espesor de pared sea igual o mayor que 10. Cuando la pared del recipiente es delgada la distribución de los esfuerzos a través del espesor no varía significativamente, y por lo tanto se supondría que es uniforme y constante. De esta forma el estado de esfuerzos de un punto de la pared del cilindro quedaría definido por los esfuerzos tangenciales  $\sigma_t$  y longitudinales  $\sigma_l$ , tal como se aprecia en la figura 1.15. Donde,  $P$  representa la presión interna,  $R_i$  el radio interno y  $t$  el espesor de pared.

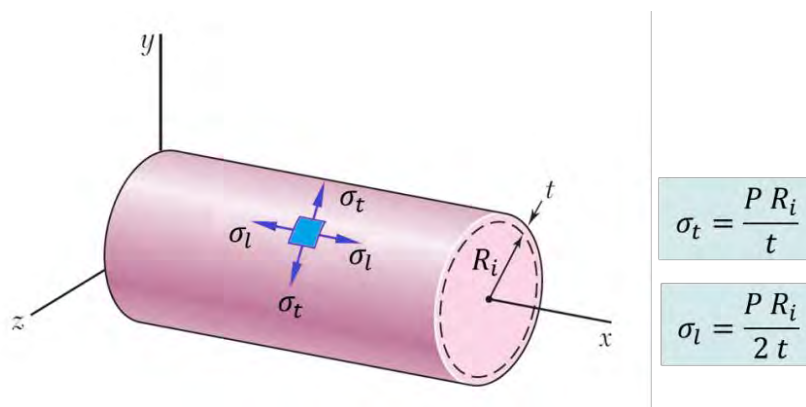


Fig. 1.15. Recipiente de pared delgada sometido a presión interna

Sin embargo, el anexo D del estándar propone una serie de expresiones para definir los esfuerzos en las inmediaciones de una fisura superficial contenida en el espesor de pared. A diferencia el planteamiento de recipientes de pared delgada, donde se asume constantes el esfuerzo a través del espesor, la fisura está sometida a una distribución variable de esfuerzos normales a su superficie, compuesta por el esfuerzo de membrana  $P_{m'}$  y el esfuerzo de flexión  $P_{f'}$ , como se puede apreciar en la figura 1.16. El esfuerzo de membrana es constante, mientras que el esfuerzo de flexión tiene un comportamiento variable lineal a lo largo del espesor de pared. La superposición de sus efectos genera la distribución de esfuerzos variable, la cual es la responsable de provocar que la fisura tienda a propagarse o dicho de otra manera, la distribución de esfuerzos normal a la cara de la fisura genera el modo de fractura del tipo apertura.

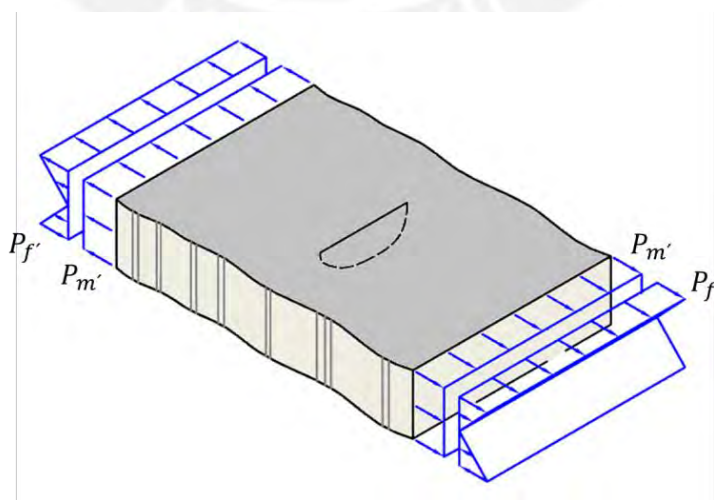
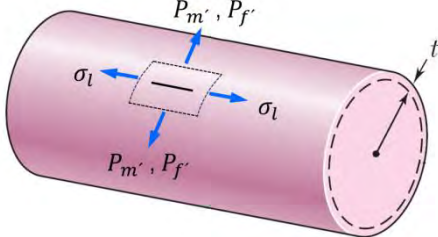
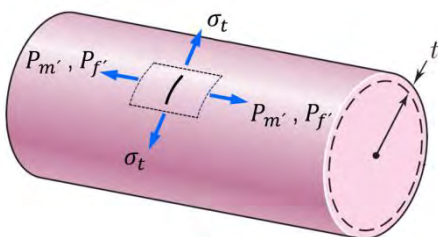


Fig. 1.16. Esfuerzos normales de membrana  $P_{m'}$  y de flexión  $P_{f'}$  a través del espesor de pared de un cilindro sometido a presión interna.



Asimismo, las expresiones de los esfuerzos normales se definen en función a la ubicación de la fisura sobre el cilindro, ya que ésta puede estar orientada en dirección longitudinal o circunferencial. La tabla 1.6 describe las expresiones analíticas de dichos esfuerzos de acuerdo a la orientación que toma la fisura sobre la superficie del cuerpo cilíndrico. Los esfuerzos paralelos a la cara de la fisura no son tomadas en cuenta, ya que éstos no provocan que la fisura tienda a crecer.

Tabla 1.6 – Expresiones de los esfuerzos normales en las inmediaciones de la fisura.

Fisura Longitudinal	Esfuerzos normales (D.47 y D.48)	
	$P_{m'} = \frac{P R_i}{t}$	Ec. 1.1
	$P_{f'} = \frac{P R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \left[ \frac{t}{R_i} - \frac{3}{2} \left( \frac{t}{R_i} \right)^2 + \frac{9}{5} \left( \frac{t}{R_i} \right)^3 \right]$	Ec. 1.2
Fisura Circunferencial	Esfuerzos normales (D.77 y D.78)	
	$P_{m'} = \frac{P R_i^2}{R_o^2 - R_i^2}$	Ec. 1.3
	$P_{f'} = 0$	Ec. 1.4

- **Caracterización del material**

Consiste en determinar las propiedades mecánicas del material dentro de las cuales se destacan el esfuerzo de fluencia  $\sigma_{ys}$ , el esfuerzo de rotura  $\sigma_r$  y la tenacidad a la fractura del material  $K_{mat}$ .

- **Determinación de la tenacidad a la fractura del material**

Uno de los aportes más importantes de la mecánica de fractura elástico lineal MFEL es haber formulado una expresión analítica que caracteriza a la fisura mediante el factor de intensidad de tensiones FIT, el cual, denotado por  $K_I$ . El subíndice  $I$  indica que se trata de un modo uno de fractura de tres tipos estudiados por MFEL. FIT representa la singularidad tensional en la cabeza de fisura que depende de la geometría del componente, del tamaño de la fisura y de la carga aplicada. Actualmente, se cuenta con una variedad de métodos para determinar el FIT a los que se puede agrupar en: expresiones analíticas, métodos numéricos y métodos experimentales. Acerca de las expresiones analíticas, en la literatura es posible encontrar compendios para una variedad de configuraciones geométricas propuestos por diferentes autores, tales como Tada y el propio estándar API 579 (Anexo C).

Por otro lado, cuando el FIT alcanza un valor crítico, se le conoce como tenacidad a la fractura  $K_{IC}$ . La tenacidad a la fractura se define como la propiedad del material para resistir a la propagación de grietas. Si el FIT está por debajo de la tenacidad a la fractura del material se afirma que no se producirá la extensión de la fisura, mientras que si se encuentra por encima de la tenacidad, se presenta la inestabilidad del comportamiento de la fisura.

Asimismo, se cuenta con procedimientos de ensayos de laboratorio para determinar la tenacidad a la fractura de un material, tales como ASTM E399 (ASTM E399, 2006) y BS 7448-2 (BS7448-2, 1997). Sin embargo, cuando el valor de tenacidad a la fractura no está disponible, un procedimiento basado en la temperatura de referencia del material  $T_{ref}$  proporciona un *valor límite inferior de tenacidad*, mediante la expresión 1.5, la cual está contenida en el anexo F del estándar (F.53) y donde  $T$  representa la temperatura de operación. La temperatura de referencia es obtenida de la Tabla 9.2M del capítulo 9 del estándar.

$$K_{IC} = 36.5 + 3.084 \exp[0.036(T - T_{ref} + 56)] \quad \text{Ec. 1.5}$$

El valor medio de la tenacidad a la fractura del material, simbolizado por  $K_{mat}^{mean}$ , se puede estimar basándose en el valor límite inferior descrito anteriormente, para ello se emplea la expresión 1.6 y las correlaciones  $B_{0-5}$  de la Tabla 1.7. Ambas, la expresión y las correlaciones, están contenidas en la Tabla F.11 del estándar.

$$\left. \frac{K_{mat}^{mean}}{K_{IC}} \right|_{sigma} = \left( \frac{1.0}{B_0 + B_1 \Delta T + B_2 \Delta T^2 + B_3 \Delta T^3 + B_4 \Delta T^4 + B_5 \Delta T^5} \right) \quad \text{Ec. 1.6}$$

Asimismo,  $\Delta T$  se define como la diferencia entre la temperatura de operación y la de referencia.

*Tabla 1.7. Extracto de la Tabla F.11 del estándar. Tabla de correlaciones entre el límite inferior y el valor medio de la tenacidad a la fractura*

Correlation	Sigma (1)	$B_0$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$
$K_{mat}^{mean} / K_{IC}$	0	0.49920	-1.2103E-4	1.7924E-5	3.8591E-8	4.6627E-11	2.9800E-13
	1	0.61401	2.2142E-4	2.1050E-5	5.9334E-8	8.3068E-11	2.9452E-13
	2	0.74203	7.6452E-4	2.4899E-5	8.5761E-8	1.3869E-10	2.8014E-13
	3	0.87961	1.5415E-4	2.9888E-5	1.1822E-7	2.1613E-10	2.7970E-13

Sigma es un factor probabilístico que depende del grado de precisión que se desea obtener y las correlaciones  $B_{0-5}$  son válidas para  $\Delta T$  entre  $-200^\circ\text{F}$  y  $400^\circ\text{F}$ .

- **Determinación de factores parciales de seguridad**

Los factores parciales de seguridad FPS (*PSF* por sus siglas en inglés) se pueden definir como aquellos valores que modifican a una determinada variable debido a la incertidumbre del mismo procedimiento. Los factores son obtenidos de la Tabla 9.3 del capítulo 9 del estándar y son aplicados a los esfuerzos de membrana y flexión (primarios), a la tenacidad del material y al valor de profundidad de la fisura, como se puede apreciar en las siguientes expresiones.

$$P_m = P_m' \cdot PSF_s \quad \text{Ec. 1.7}$$

$$P_f = P_f' \cdot PSF_s \quad \text{Ec. 1.8}$$

$$K_{mat} = \frac{K_{mat}'}{PSF_k} \quad \text{Ec. 1.9}$$

$$a = a' \cdot PSF_a \quad \text{Ec. 1.10}$$

Un extracto de la Tabla 9.3 está contenido en la Tabla 1.8, donde se aprecian los diferentes *PSF* que son definidos en base a diferentes parámetros que se describen a continuación. La probabilidad de falla  $p_f$  y el coeficiente  $\beta$  están asociados a índices de seguridad.  $COV_s$  es un coeficiente de variación utilizado para definir la incertidumbre

de la distribución de los esfuerzos primarios, donde se emplea el valor 0.1 si los esfuerzos primarios calculados o medidos en las inmediaciones de la fisura son confiables; 0.2, si los estos mismos esfuerzos son razonablemente confiables y la incertidumbre se debe a posibles variaciones en las cargas aplicadas o estimaciones en el modelo de análisis de esfuerzo; y 0.3, si las estimaciones de los esfuerzos primarios son considerablemente inciertos.

Tabla 1.8 – Extracto de la tabla 9.3 del estándar. Tabla de factores parciales de seguridad FPS

Shallow Cracks: $a < 5 \text{ mm}$ (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	1.0	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

Asimismo,  $R_c$  es un valor de corte usado para definir regiones de colapso fractura frágil/plástico y colapso plástico, mientras que el parámetro  $R_{ky}$ , definido mediante la expresión (1.9), conjuntamente con  $R_c$  permiten determinar los FPS. La expresión 1.11 está implementada con las variables  $K_{mat}^{mean}$  y  $C_u$ , las cuales representan a un valor medio de la tenacidad a la fractura del material y a un valor de conversión de unidades (1 si se emplea  $ksi\sqrt{in}$  y 6.275 si se al emplea  $MPa\sqrt{m}$ .), respectivamente.

$$R_{ky} = \frac{K_{mat}^{mean}}{\sigma_{ys}} C_u \quad \text{Ec. 1.11}$$

- **Determinación de esfuerzos de referencia**

El anexo D del estándar contiene expresiones analíticas de esfuerzos de referencia para una serie de configuraciones geométricas de fisuras contenidas en recipientes presurizados. Esfuerzos de referencia que no sean encontrados podrían ser estimados utilizando un método numérico como el método de Elementos Finitos. El esfuerzo de referencia es un parámetro que estima el estado de tensiones alrededor de la fisura contemplando la geometría y ubicación de la misma y el tipo de componente que la contiene. Tomando como referencia el anexo D del estándar, se extraen las expresiones D.74 y D.76, las cuales definen el esfuerzo de referencia de un componente cilíndrico que contiene una fisura superficial de forma semi elíptica en dirección longitudinal (1.12) y circunferencial (1.18), respectivamente. Ambas expresiones son descritas a continuación.

*Cilindro - fisura semi - elíptica superficial en dirección longitudinal*

$$\sigma_{ref} = \frac{g \cdot P_f + (g \cdot P_f^2 + 9 \{M_s \cdot P_m \cdot (1 - \alpha)^2\}^2)^{0.5}}{3(1 - \alpha)^2} \quad \text{Ec. 1.12}$$

Donde,  $P_f$  y  $P_m$  son respectivamente los esfuerzos de membrana y flexión afectados por los FPS.  $\alpha$  y  $g$  son parámetros que vinculan el espesor de pared  $t$  con las dimensiones de la fisura, cuyas expresiones están dadas por las ecuaciones 1.13 y 1.14.

$$\alpha = \frac{a/t}{1 + t/c} \quad \text{Ec. 1.13}$$

$$g = 1 - 20 \left( \frac{a}{2c} \right)^{0.75} \alpha^3 \quad \text{Ec. 1.14}$$

$M_s$  y  $M_t$  son factores de corrección para la fisura en su dimensión superficial y a través del espesor, respectivamente, descritas en por las expresiones 1.15 y 1.16. Adicionalmente,  $\lambda$  (1.17) es un parámetro superficial empleado para determinar los factores de corrección mencionados.

$$M_s = \frac{1}{1 - \frac{a}{t} + \frac{a}{t} \left( \frac{1}{M_t \lambda_a} \right)} \quad \text{Ec. 1.15}$$

$$M_t = \left( \frac{1.02 + 0.4411\lambda^2 + 0.006124\lambda^4}{1.0 + 0.02642\lambda^2 + 1.533(10^{-6})\lambda^4} \right)^{0.5} \quad \text{Ec. 1.16}$$

$$\lambda_a = \frac{1.818 c}{\sqrt{R_i a}} \quad \text{Ec. 1.17}$$

*Cilindro - fisura semi - elíptica superficial en dirección circunferencial*

$$\sigma_{ref} = \frac{P_f + (P_f^2 + 9\{Z \cdot P_m \cdot (1 - \alpha)^2\}^2)^{0.5}}{3(1 - \alpha)^2} \quad \text{Ec. 1.18}$$

$\alpha$  es el mismo son parámetro que vincula el espesor de pared  $t$  con la profundidad de la fisura, la cual ha sido definida por la ecuación 1.13. La ecuación 1.19 define al parámetro  $Z$ , el cual depende a su vez de los factores  $\tau$  y  $\psi$ , los cuales son parámetros descritos por las expresiones 1.20 y 1.21, respectivamente. Adicionalmente,  $Z$  depende de  $\theta$ , denominado como la mitad del ángulo de la fisura sobre la superficie externa del cilindro, definido por 1.23 y  $x$  que es la coordenada local radial descrita por 1.24.

$$Z = \left[ \frac{2\psi}{\pi} - \frac{x\theta}{\pi} \left( \frac{2 - 2\tau + x\tau}{2 - \tau} \right) \right]^{-1} \quad \text{Ec. 1.19}$$

$$\tau = \frac{t}{R_0} \quad \text{Ec. 1.20}$$

$$\psi = \arccos(A \sin \theta) \quad \text{Ec. 1.21}$$

$$A = x \left[ \frac{(1 - \tau)(2 - 2\tau + x\tau) + (1 - \tau + x\tau)^2}{2(1 + (2 - \tau)(1 - \tau))} \right] \quad \text{Ec. 1.22}$$

$$\theta = \frac{\pi c}{4R_0} \quad \text{Ec. 1.23}$$

$$x = \frac{a}{t} \quad \text{Ec. 1.24}$$

- **Determinación del ratio de carga**

En el paso anterior se obtuvo el esfuerzo de referencia  $\sigma_{ref}$ , el cual debe ser relacionado con el esfuerzo de fluencia del material  $\sigma_{ys}$ . La relación de estos parámetros define al ratio de carga, la cual se constituye como la variable que toma lugar en el eje de las abscisas del diagrama de falla FAD. La expresión 1.25 describe al ratio de carga, cuyo superíndice hace referencia a que evalúa cargas principales.

$$L_r^P = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_{ys}} \quad \text{Ec. 1.25}$$

- **Determinación de factores de intensidad de tensiones**

Como ya se había mencionado, el factor de intensidad de tensiones FIT, denotado como  $K_I$ , caracteriza el comportamiento de la fisura a través de una expresión analítica, la cual depende de la geometría del componente, del tamaño de la fisura y de la carga aplicada. Las expresiones analíticas pueden ser obtenidas de la literatura, sin embargo en el anexo C del estándar es considerado como un compendio de expresiones de una variedad de configuraciones geométricas.

A continuación se describen las expresiones analíticas C.187 y C194, tomadas del anexo C del estándar, que definen componentes cilíndricos sometidos a presión interna que contienen fisuras superficiales externas de forma semi elípticas en dirección longitudinal (1.26) y circunferencial (1.45).

*Cilindro - fisura semi - elíptica superficial externa en dirección longitudinal*

$$K_I = \frac{PR_i^2}{R_0^2 - R_i^2} \left[ 2G_0 + 2G_1 \left( \frac{a}{R_0} \right) + 3G_2 \left( \frac{a}{R_0} \right)^2 + 4G_3 \left( \frac{a}{R_0} \right)^3 + 5G_4 \left( \frac{a}{R_0} \right)^4 \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad \text{Ec. 1.26}$$

$G_0$  y  $G_1$  son factores definidos por las expresiones 1.27 y 1.28, respectivamente, y dependen de los parámetros  $\beta$ ,  $A_{i,0}$  y  $A_{i,1}$ . El parámetro  $\beta$ , descrito por la ecuación 1.29, depende a su vez del ángulo  $\varphi$ , el cual describe a cada punto del frente de propagación de la fisura, como lo muestra la figura 1.17, donde los puntos de interés son los ubicados a  $\varphi = 90^\circ$ , frente de propagación en dirección del espesor del

material, y  $\varphi = 0^\circ$ , frente de propagación sobre la superficie del componente. Mientras que los  $A_{i,0}$  y  $A_{i,1}$  son obtenidos de la Tabla C.13 del anexo C del estándar.

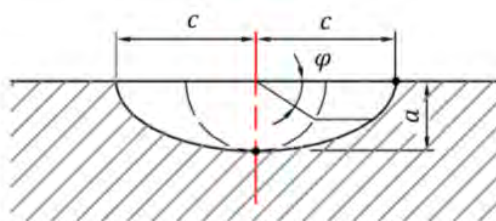


Fig. 1.17. Características geométricas de una fisura semi elíptica superficial.

$$G_0 = A_{0,0} + A_{1,0}\beta + A_{2,0}\beta^2 + A_{3,0}\beta^3 + A_{4,0}\beta^4 + A_{5,0}\beta^5 + A_{6,0}\beta^6 \quad \text{Ec. 1.27}$$

$$G_1 = A_{0,1} + A_{1,1}\beta + A_{2,1}\beta^2 + A_{3,1}\beta^3 + A_{4,1}\beta^4 + A_{5,1}\beta^5 + A_{6,1}\beta^6 \quad \text{Ec. 1.28}$$

$$\beta = \frac{2\varphi}{\pi} \quad \text{Ec. 1.29}$$

$$0 < \varphi < \pi \quad \text{Ec. 1.30}$$

Los factores  $G_{2,3,4}$  son obtenidos de 1.31 a 1.36. Cuando el punto de interés es  $\varphi = 90^\circ$  se emplean las ecuaciones 1.31 a 1.33, mientras que si la evaluación es sobre los extremos superficiales,  $\varphi = 0^\circ$ , las expresiones utilizadas son de 1.34 a 1.36.

$$G_2 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left( \frac{16}{15} + \frac{1}{3}M_1 + \frac{16}{105}M_2 + \frac{1}{12}M_3 \right) \quad \text{Ec. 1.31}$$

$$G_3 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left( \frac{32}{35} + \frac{1}{4}M_1 + \frac{32}{315}M_2 + \frac{1}{20}M_3 \right) \quad \text{Ec. 1.32}$$

$$G_4 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left( \frac{256}{315} + \frac{1}{5}M_1 + \frac{256}{3465}M_2 + \frac{1}{30}M_3 \right) \quad \text{Ec. 1.33}$$

$$G_2 = \frac{\sqrt{Q}}{\pi} \left( \frac{4}{5} + \frac{2}{3}N_1 + \frac{4}{7}N_2 + \frac{1}{2}N_3 \right) \quad \text{Ec. 1.34}$$

$$G_3 = \frac{\sqrt{Q}}{\pi} \left( \frac{4}{7} + \frac{1}{2}N_1 + \frac{4}{9}N_2 + \frac{2}{5}N_3 \right) \quad \text{Ec. 1.35}$$

$$G_4 = \frac{\sqrt{Q}}{\pi} \left( \frac{4}{9} + \frac{2}{5}N_1 + \frac{4}{11}N_2 + \frac{1}{3}N_3 \right) \quad \text{Ec. 1.36}$$

Donde las variables  $M_{1,2,3}$  y  $N_{1,2,3}$ , expresiones 1.37 a 1.42, dependen de  $Q$ , a excepción de 1.38. El parámetro geométrico  $Q$  se define mediante las expresiones 1.43 y 1.44.



$$M_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2Q}}(3G_1 - G_0) - \frac{24}{5} \quad \text{Ec. 1.37}$$

$$M_2 = 3 \quad \text{Ec. 1.38}$$

$$M_3 = \frac{6\pi}{\sqrt{2Q}}(G_0 - 2G_1) + \frac{8}{5} \quad \text{Ec. 1.49}$$

$$N_1 = \frac{3\pi}{\sqrt{Q}}(2G_0 - 5G_1) - 8 \quad \text{Ec. 1.40}$$

$$N_2 = \frac{15\pi}{\sqrt{Q}}(3G_1 - G_0) + 15 \quad \text{Ec. 1.41}$$

$$N_3 = \frac{3\pi}{\sqrt{Q}}(3G_0 - 10G_1) - 8 \quad \text{Ec. 1.42}$$

$$Q = 1 + 1.464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.65} \quad \frac{a}{c} \leq 1 \quad \text{Ec. 1.43}$$

$$Q = 1 + 1.464 \left(\frac{c}{a}\right)^{1.65} \quad \frac{a}{c} > 1 \quad \text{Ec. 1.44}$$

### ***Cilindro - fisura semi - elíptica superficial externa en dirección circunferencial***

$$K_I = G_0 \left[ \frac{PR_i^2}{R_0^2 - R_i^2} \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad \text{Ec. 1.45}$$

$G_0$  es el mismo factor definido por la expresión 1.27 que dependen de las variables  $A_{i,0}$ , los cuales son obtenidos de la Tabla C.15 de estandar.

#### **• Determinación del ratio de tenacidad**

En el paso anterior se obtuvo el factor de intensidad de tensiones  $K_I$ , el cual se relacionado con la tenacidad a la fractura del material  $K_{mat}$ . La relación de estos parámetros define al ratio de tenacidad  $K_r$ , la cual se constituye como la variable en el eje de las ordenadas en el diagrama FAD. La expresión 1.46 describe al ratio de tenacidad, siendo  $K_I^P$  el factor de intensidad de tensiones debido a cargas principales,  $K_I^{SR}$  es el factor de intensidad de tensiones debido a cargas secundarias y esfuerzos residuales,  $\phi$  es el factor de corrección por plasticidad, y  $K_{mat}$  la tenacidad a la fractura del material.

$$K_r = \frac{K_I^P + \phi K_I^{SR}}{K_{mat}} \quad \text{Ec. 1.46}$$

- **Diagnóstico empleando diagrama de falla FAD**

La evaluación propuesta por el estándar API 579 permite mediante un diagrama de falla *FAD*, diagnosticar si el componente fisurado puede seguir operando. La abscisa del diagrama *FAD*, ratio de tenacidad, mide la resistencia del material a la fractura tomando en consideración los factores de intensidad de tensiones generados por la presencia de la fisura. Por su lado, la ordenada del diagrama *FAD*, ratio de carga, considera la carga aplicado sobre el componente y el límite admisible del material. El diagrama *FAD* como una herramienta de diagnóstico define una curva límite que delimita dos regiones. Una región bajo la curva que indica que el componente evaluado presenta tolerancia ante la presencia de la fisura y que podría seguir operando, y otra región, por encima de la curva que indica la inminente falla del componente. La curva límite del diagrama *FAD* expresada en 1.47 es obtenida del capítulo 9 (Ec. 9.30) del estándar, la cual es empleada durante una evaluación de Nivel 2, pero adolece de contemplar algún parámetro característico del material.

$$K_r = [1 - 0.14(L_r)^2]\{0.3 + 0.7 \exp[-0.65(L_r)^6]\} \quad \text{Ec. 1.47}$$

Por su lado, el Nivel 3 requiere que la curva límite del diagrama *FAD* se determine del comportamiento del material, para ello, mediante ensayos de laboratorio, se obtiene la curva esfuerzo – deformación y sus respectivos valores experimentales,  $\sigma_{es}$  y  $\varepsilon_{es}$ . A partir de estos valores se determina la curva esfuerzo – deformación real, es decir valores de esfuerzo  $\sigma_t$  y deformación  $\varepsilon_t$  reales, empleando las relaciones 1.48 y 1.49. Determinados los valores reales, se define la curva límite *FAD* real utilizando la expresión 1.50, la cual es obtenida del capítulo 9 (Ec. 9.27) del estándar.

$$\sigma_t = (1 + \varepsilon_{es}) \sigma_{es} \quad \text{Ec. 1.48}$$

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_{es}) \quad \text{Ec. 1.49}$$

$$K_r = \left( \frac{E \varepsilon_t}{L_r \sigma_{ys}} + \frac{(L_r)^3 \sigma_{ys}}{2 E \varepsilon_t} \right)^{-1/2} \quad 0.0 < L_r \leq L_r(\text{máx}) \quad \text{Ec. 1.50}$$

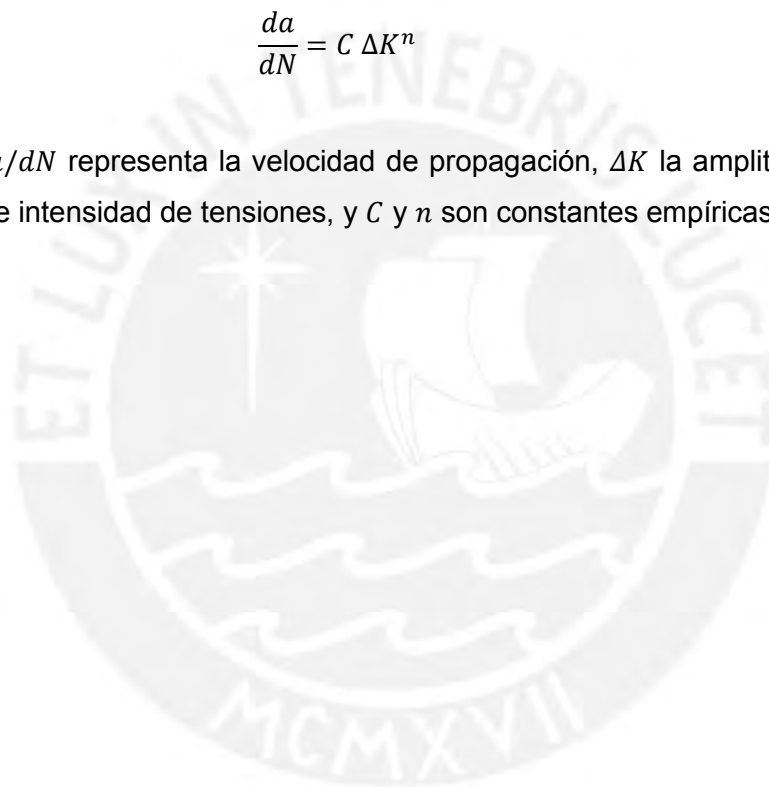
$$K_r = 1.0 \quad L_r = 0.0$$

- **Determinación de la propagación de la fisura**

La propagación de una fisura se debe a una serie de mecanismos y uno de los más frecuentes se produce cuando un componente se encuentra sometido a fatiga. La fatiga es un proceso de acumulación de daño, agrietamiento y fractura de un componente sometido a cargas fluctuantes, variables o cíclicas. Una forma simple y muy conocida para estudiar la propagación de fisuras es el modelo de Paris. Paris determinó que para la gran mayoría de los materiales se cumple la siguiente relación.

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^n \quad \text{Ec. 1.51}$$

Donde,  $da/dN$  representa la velocidad de propagación,  $\Delta K$  la amplitud de los valores factores de intensidad de tensiones, y  $C$  y  $n$  son constantes empíricas.



## Capítulo 2

### Implementación de un Procedimiento de Evaluación de Integridad de fisuras en Cilindros Presurizados en el Marco del Estándar API 579

El parámetro más importante que caracteriza a una fisura, bajo el enfoque de la mecánica de fractura elástico lineal, es el factor de intensidad de tensiones FIT y conjuntamente con el diagrama FAD y el estado tensional en las inmediaciones de la fisura, es posible evaluar la influencia de dicha fisura sobre la integridad estructural de un cilindro sometido a presión interna, como se ha descrito en el acápite 1.3.1.

#### 2.1 Caso de estudio

El parque automotriz peruano de vehículos a GNV utiliza cilindros de almacenamiento del Tipo 1 (ver Tabla 1.2), los cuales operan alrededor de 20 MPa cuando se encuentra llenos a su máxima capacidad. De darse la situación de detectar una pequeña fisura superficial, se requeriría de criterios técnicos para realizar una evaluación del equipo. En el presente capítulo se implementa un procedimiento de evaluación de integridad de fisuras semi elípticas, en dirección longitudinal y circunferencial de 0.4 mm de profundidad y 1.6 mm de longitud, impuestas sobre la superficie exterior de un tanque de GNV-1. El procedimiento a través de un diagrama FAD permitirá el diagnóstico del componente bajo los criterios bajo el marco del estándar API 579.

#### 2.2 Caracterización del recipiente

El tanque empleado para el estudio posee 920 mm de longitud, 323 mm de diámetro externo y un espesor de pared de 8.25 mm, y al ser de Tipo 1, se caracteriza por ser de acero y no contar con recubrimiento alguno. La figura 2.1 muestra el tanque en una sección completa con sus respectivas dimensiones y la Tabla 2.1 las variables geométricas que se utilizarán en las posteriores expresiones.

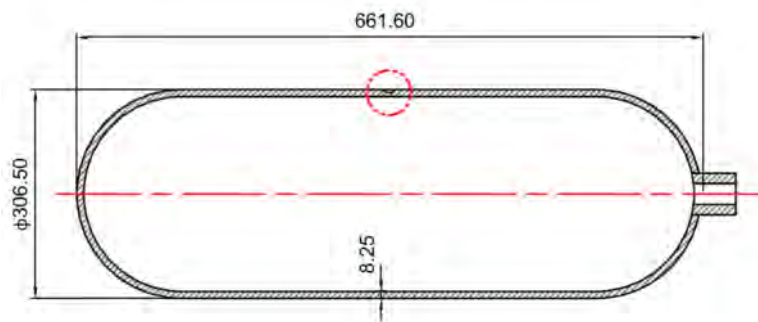


Fig. 2.1. Dimensiones de un cilindro de GNV, tipo 1.

Tabla 2.1. Características geométricas del tanque de GNV

Característica	Medida	Unidad
Radio exterior $R_o$	161.50	mm
Radio interior $R_i$	153.25	mm
Espesor de pared $t$	8.25	mm

Adicionalmente, la información proporcionada por el fabricante se muestra en la tabla 2.2, sin embargo el tipo de acero tuvo que ser determinado mediante ensayos experimentales. El informe del laboratorio señala que el material del recipiente es un acero de medio carbono y baja aleación Cr – Mo (ver anexo 1).

Tabla 2.2. Información técnica del tanque de GNV

Característica	Medida	Unidad
Presión de diseño $P_d$	30	MPa
Temperaturas de diseño $T_d$	-40 a 65	°C

### 2.3 Caracterización de la fisura

El tanque ha sido analizado bajo dos escenarios. Primero, el componente presenta una fisura superficial semi elíptica en dirección longitudinal (paralelo al eje del cilindro) y segundo, presenta una fisura superficial semi elíptica en dirección circunferencial (transversal al eje del cilindro), como se pueden apreciar en las figuras 1.13 y 1.14 del capítulo anterior. Ambas fisuras son impuestas sobre la superficie exterior del tanque y sus dimensiones son 0.4 mm de profundidad y 1.6 mm de longitud (ver figura 1.12b), tal como lo muestra la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Características geométricas de la fisura semi elíptica

Dimensión	Medida	Unidad
Profundidad $a'$	0.4	mm
Longitud $2c$	1.6	mm

## 2.4 Identificación de las condiciones de operación

La Tabla 2.4 describe las condiciones de operación, donde se considera que el tanque opera sometido a presión interna fluctuante cuyos valores máximo es de 200 bar, cuando el tanque se encuentra lleno, y mínimo es de 5 bar, cuando el tanque se encuentra vacío. Adicionalmente, se asume que el lugar de trabajo (maletera del auto) es un medio no agresivo y que la temperatura promedio de operación es de 15°C.

Tabla 2.4. Condiciones de operación del tanque de GNV

Condición	Medida	Unidad
Presión de operación máxima $P_o$	20	MPa
Presión de operación mínima $P_o$	0.5	MPa
Temperaturas de operación $T_o$	15	°C
Medio de operación	No agresivo	

## 2.5 Determinación del estado de esfuerzos en las inmediaciones de la fisura

La carga principal que genera los esfuerzos primarios sobre el tanque es la presión interna  $P$ . Los esfuerzos secundarios son ausentes, ya que no hay alguna carga que los pueda generar y ante la usencia de soldadura, no hay esfuerzos residuales.

Los esfuerzos de membrana y de flexión (ver Tabla1.6 del capítulo 1) son estimados empleando las expresiones 1.1 y 1.2 para la fisura longitudinal y 1.3 y 1.4 para la fisura circunferencial. Cabe señalar que el presente procedimiento se lleva acabo utilizando la presión máxima de 20 MPa, ya que la fluctuación de la carga será de interés en los posteriores capítulos.

- *Cilindro - fisura semi - elíptica superficial en dirección longitudinal.*

$$P_m = \frac{PR_i}{t} [MPa, mm] = \frac{(20)(153.25)}{(8.25)} = 371.52 MPa$$

$$P_{f'} = \frac{P R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \left[ \frac{t}{R_i} - \frac{3}{2} \left( \frac{t}{R_i} \right)^2 + \frac{9}{5} \left( \frac{t}{R_i} \right)^3 \right] \quad [MPa, mm]$$

$$= \frac{(20)(161.5)^2}{(161.5)^2 - (153.25)^2} \left( \frac{8.25}{153.25} - \frac{3}{2} \left( \frac{8.25}{153.25} \right)^2 + \frac{9}{5} \left( \frac{8.25}{153.25} \right)^3 \right)$$

$$= 10.0 \text{ MPa}$$

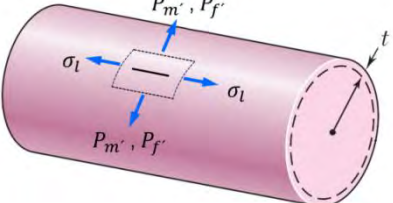
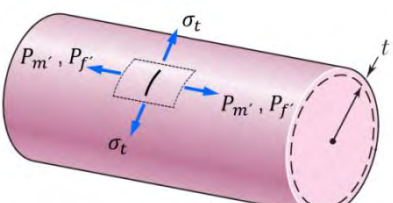
- *Cilindro - fisura semi - elíptica superficial en dirección circunferencial*

$$P_{m'} = \frac{P R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \quad [MPa, mm] = \frac{(20)(153.25)^2}{(161.5)^2 - (153.25)^2} = 180.89 \text{ MPa}$$

$$P_{f'} = 0$$

A continuación la Tabla 2.5 muestra un resumen de los esfuerzos normales determinados en las inmediaciones de la fisura semi elíptica en las dos orientaciones

Tabla 2.5. Resultados de los esfuerzos en las inmediaciones de la fisura.

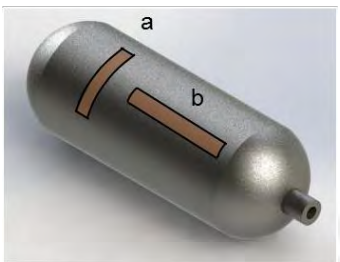
Fisura Longitudinal	Esfuerzos normales	Resultado	Unidad
	Membrana $P_{m'}$	371.52	MPa
	Flexión $P_{f'}$	10.00	MPa
Fisura Circunferencial	Esfuerzos normales	Resultado	Unidad
	Membrana $P_{m'}$	180.89	MPa
	Flexión $P_{f'}$	0.00	---

## 2.6 Caracterización del material

Para determinar el tipo de acero del tanque se requirieron ensayos experimentales. El análisis químico del informe del laboratorio indica que de acuerdo a la composición química de la muestra proporcionada y teniendo como referencia el ASM METALS REFERENCE BOOK, el material analizado es compatible con un acero de medio carbono y baja aleación Cr – Mo (ver anexo 1). El mismo informe muestra la curva

fuerza – alargamiento y determina el esfuerzo de fluencia en las dos direcciones de probetas que fueron suministradas, tal como se muestra en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Resultados de los esfuerzos de fluencia y rotura en dos direcciones del tanque.

Probetas		Fluencia	Rotura	Unidad
	Circunferencial a	660	894	MPa
	Longitudinal b	756	894	MPa

## 2.7 Determinación de la tenacidad a la fractura del material

Acerca la tenacidad a la fractura del material  $K_{mat}$ , no se ha logrado reproducir ensayos experimentales que puedan ofrecer esta propiedad, por ello se ha optado por el empleo del procedimiento basado en la temperatura de referencia  $T_{ref}$  (Tabla 9.2M – Parte 9 / API579) que el estándar propone, el cual se describe en el siguiente párrafo.

Como ha sido mencionado en el primer capítulo, el estándar proporciona la expresión 1.5 (ecuación F.38 – Anexo F) para determinar un valor límite inferior de tenacidad  $K_{IC}$ , el cual permite determinar un valor medio de la tenacidad del material  $K_{mat}^{mean}$ , a través de la expresión 1.6 (Tabla F.11 – Anexo F). Justamente, este último es el valor empleado como propiedad del material cuando no se cuenta con información experimental. A continuación se procede a determinar la tenacidad a la fractura del material.

- *Temperatura de referencia  $T_{ref}$ .* Empleando la Tabla 9.2M – Parte 9 del estándar e identificando que el esfuerzo de fluencia del material supera los 560 MPa y que el acero del tanque puede ser definido como tipo B, se determina que la temperatura de referencia es igual a  $-11^{\circ}\text{C}$ .
- *Valor límite inferior de tenacidad  $K_{IC}$*



$$\begin{aligned}
 K_{IC} &= 36.5 + 3.084 \exp[0.036(T - T_{ref} + 56)] \quad [MPa\sqrt{m}, ^\circ C] \\
 &= 36.5 + 3.084 \exp[0.036(15 - (-11) + 56)] = 95.54 \text{ MPa}\sqrt{m}
 \end{aligned}$$

- Valor medio de la tenacidad a la fractura del material  $K_{mat}^{mean}$

$$\left. \frac{K_{mat}^{mean}}{K_{IC}} \right|_{\sigma=1} = \left( \frac{1.0}{B_0 + B_1\Delta T + B_2\Delta T^2 + B_3\Delta T^3 + B_4\Delta T^4 + B_5\Delta T^5} \right) \quad [MPa\sqrt{m}, ^\circ F]$$

Donde,

- $\Delta T = T - T_{ref} \text{ [}^\circ F\text{]} = 59 - 12.2 = 46.8 \text{ }^\circ F$
- Empleando la Tabla F.11 del estándar, se asume Sigma igual a 1 y se seleccionan los siguientes valores para las correlaciones  $B_{0-5}$  (Tabla 2.7):

Tabla 2.7. Valores de correlaciones obtenidos de la Tabla F.11 del estándar

Correlación	
$B_0$	0.61401
$B_1$	$2.2142(10)^{-04}$
$B_2$	$2.1050(10)^{-05}$
$B_3$	$5.9334(10)^{-08}$
$B_4$	$8.3068(10)^{-11}$
$B_5$	$2.9452(10)^{-13}$

Entonces,

$$\begin{aligned}
 K_{mat}^{mean} &= K_{IC} (B_0 + B_1\Delta T + B_2\Delta T^2 + B_3\Delta T^3 + B_4\Delta T^4 + B_5\Delta T^5)^{-1} \\
 &= (95.54) \left( (0.61401) + (2.2142(10)^{-4})(46.8) \right. \\
 &\quad \left. + (2.1050(10)^{-5})(46.8)^2 + (5.9334(10)^{-8})(46.8)^3 \right. \\
 &\quad \left. + (8.3068(10)^{-11})(46.8)^4 + (2.9452(10)^{-13})(46.8)^5 \right)^{-1} \\
 &= 141.12 \text{ MPa}\sqrt{m}
 \end{aligned}$$

## 2.8 Determinación de factores parciales de seguridad

De acuerdo a lo descrito en el primer capítulo (acápito 1.3.1), los factores parciales de seguridad FPS (*PSF* por sus siglas en inglés) modifican a los esfuerzos primarios, a la tenacidad del material y a la profundidad de la fisura con la finalidad de contemplar la

incertidumbre de alguno de los pasos del proceso. Para determinar los FPS, previamente se deben hallar y seleccionar las siguientes variables.

- Probabilidad de falla  $p_f$  y coeficiente  $\beta$ . Se considera que la probabilidad es igual a  $10^{-3}$  y el coeficiente igual a 3.09.
- $COV_s$ . El coeficiente de incertidumbre de la distribución de esfuerzos primarios es igual a 0.1, ya que los cálculos de dichos esfuerzos son confiables.
- $R_c$ . El valor de corte para definir regiones de colapso es igual a 1.4.
- $R_{ky}$ . Relación entre el valor medio de tenacidad del material y el esfuerzo de fluencia.

$$R_{ky} = \frac{K_{mat}^{mean}}{\sigma_{ys}} C_u [MPa\sqrt{m}, MPa] = \frac{(141.12)}{(660)} (6.275) = 1.34$$

- Se cumple que  $R_{ky} \leq R_c$

Entonces, halladas y seleccionadas las variables y empleando la Tabla 9.3 del estándar, se designa los FPS mostrados en la Tabla 2.8.

*Tabla 2.8. Resultados de los parámetros esfuerzo, tenacidad y profundidad después de ser modificados por los FPS.*

Variable	FPS	Datos	Resultados	Unidad
<b>Esfuerzos - Fisura Longitudinal</b>				
	$PSF_s$	Tabla 2.5		
Membrana $P_m$	1.5	371.52	<b>557.28</b>	MPa
Flexión $P_f$	1.5	10.00	<b>15.00</b>	MPa
<b>Esfuerzos - Fisura Circunferencial</b>				
	$PSF_s$	Tabla 2.5		
Membrana $P_m$	1.5	180.89	<b>271.33</b>	MPa
Flexión $P_f$	1.5	0.00	<b>0.00</b>	---
<b>Tenacidad a la fractura</b>				
	$PSF_k$	Acápite 2.7		
Tenacidad a la fractura $K_{mat}$	1.0	141.12	<b>141.12</b>	MPa.m <sup>-0.5</sup>
<b>Dimensiones de la fisura</b>				
	$PSF_a$	Tabla 2.3		
Profundidad de fisura $a$	1.0	0.40	<b>0.40</b>	mm

## 2.9 Determinación de esfuerzos de referencia

El anexo D del estándar contiene expresiones de esfuerzos de referencia (D.74 y D.76) para un componente cilíndrico que contiene una fisura superficial de forma semi

elíptica en dirección longitudinal y circunferencial, las mismas que ya han sido descritas por la ecuaciones 1.12 y 1.18, respectivamente. A continuación se desarrollan los cálculos para determinar los esfuerzos de referencia pertinentes.

- *Cilindro - fisura semi - elíptica superficial en dirección longitudinal*

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

Donde,

- $\alpha = \frac{a/t}{1+t/c} = \frac{0.4/8.25}{1+8.25/0.8} = 4.286(10)^{-3}$
- $g = 1 - 20 \left(\frac{a}{2c}\right)^{0.75} \alpha^3 = 1 - 20 \left(\frac{0.4}{2(0.8)}\right)^{0.75} (4.286(10)^{-3})^3 = 1$
- $\lambda_a = \frac{1.818 c}{\sqrt{R_i a}} = \frac{1.818 (0.8)}{\sqrt{(153.25) (0.4)}} = 185.76(10)^{-3}$
- $M_t = \left(\frac{1.02+0.4411\lambda^2+0.006124\lambda^4}{1.0+0.02642\lambda^2+1.533(10^{-6})\lambda^4}\right)^{0.5} =$   
 $\left(\frac{1.02+0.4411(185.76(10)^{-3})^2+0.006124(185.76(10)^{-3})^4}{1.0+0.02642(185.76(10)^{-3})^2+1.533(10^{-6})(185.76(10)^{-3})^4}\right)^{0.5} = 1.017$
- $M_s = \frac{1}{1-\frac{a}{t}+\frac{a}{t}(1/M_t \lambda_a)} = \frac{1}{1-0.4/8.25+0.4/8.25(1/(1.017)(185.76(10)^{-3}))} = 1.001$

Entonces,

$$\begin{aligned} \sigma_{ref} &= \frac{g \cdot P_f + (g \cdot P_f^2 + 9 \{M_s \cdot P_m \cdot (1 - \alpha)^2\}^2)^{0.5}}{3(1 - \alpha)^2} \\ &= \frac{(1)(15) + ((1)(15)^2 + 9 \{(1.001)(557.28)(1 - 4.286(10)^{-3})^2\}^2)^{0.5}}{3(1 - (4.286(10)^{-3}))^2} \\ &= 562.79 \text{ MPa} \end{aligned}$$

- *Cilindro - fisura semi - elíptica superficial en dirección circunferencial*

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

Donde,

- $\alpha = \frac{a/t}{1+t/c} = \frac{0.4/8.25}{1+8.25/0.8} = 4.286(10)^{-3}$
- $\tau = \frac{t}{R_0} = \frac{8.25}{161.5} = 5.11(10)^{-2}$

- $\theta = \frac{\pi c}{4R_o} = \frac{\pi(0.8)}{4(161.5)} = 3.89(10)^{-3}$
- $x = \frac{a}{t} = \frac{0.4}{8.25} = 4.85(10)^{-2}$
- $A = x \left[ \frac{(1-\tau)(2-2\tau+x\tau)+(1-\tau+x\tau)^2}{2(1+(2-\tau)(1-\tau))} \right] = 2.34(10)^{-2}$
- $\psi = \arccos(A \sin \theta) = \arccos(2.34(10)^{-2} \sin(3.89(10)^{-3})) = 1.571$
- $Z = \left[ \frac{2\psi}{\pi} - \frac{x\theta}{\pi} \left( \frac{2-2\tau+x\tau}{2-\tau} \right) \right]^{-1} = 1$

Entonces,

$$\begin{aligned} \sigma_{ref} &= \frac{P_f + (P_f^2 + 9\{Z \cdot P_m \cdot (1 - \alpha)^2\}^2)^{0.5}}{3(1 - \alpha)^2} \\ &= \frac{(0) + ((0)^2 + 9\{(1)(271.33)(1 - (4.286(10)^{-3}))^2\}^2)^{0.5}}{3(1 - (4.286(10)^{-3}))^2} \\ &= 271.33 \text{ MPa} \end{aligned}$$

## 2.10 Determinación del ratio de carga

El ratio de carga se define como la relación de los esfuerzos de referencia y de fluencia (expresión 1.25), la cual se constituye como la variable del eje de las abscisas del diagrama de falla FAD.

- *Cilindro - fisura semi - elíptica superficial en dirección longitudinal*

$$L_r^P = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_{ys}} = \frac{562.79}{660} = 0.853$$

- *Cilindro - fisura semi - elíptica superficial en dirección circunferencial*

$$L_r^P = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_{ys}} = \frac{271.33}{756} = 0.359$$

## 2.11 Determinación de factores de intensidad de tensiones

En base a la información contenida en el anexo C del estándar (C.187 y C194), se han definido previamente las expresiones 1.26 y 1.45, las cuales permiten determinar el factor de intensidad de tensiones de componentes cilíndricos sometidos a presión interna que contienen fisuras superficiales externas de forma semi elípticas en dirección longitudinal y circunferencial.

- *Cilindro - fisura semi - elíptica superficial externa en dirección longitudinal*

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

Donde,

- $A_{i,0}$  y  $A_{i,1}$ . Empleando la Tabla C.13 del anexo C y cumpliendo las relaciones:  $t/R_i = 0.05$ ,  $a/c = 0.5$ ,  $a/t = 0.05$ , se seleccionan los factores  $A_{i,0}$  y  $A_{i,1}$  (ver Tabla 2.9).

Tabla 2.9. Factores  $A_{ij}$  obtenidos de la Tabla C.13 del estándar

Factores		Factores	
$A_{0,0}$	0.8776607	$A_{1,0}$	0.1277541
$A_{1,0}$	-0.6729719	$A_{1,1}$	0.4368502
$A_{2,0}$	3.7721411	$A_{1,2}$	0.4904522
$A_{3,0}$	-6.5209060	$A_{1,3}$	1.0427434
$A_{4,0}$	6.3377934	$A_{1,4}$	-2.9631236
$A_{5,0}$	-3.7028038	$A_{1,5}$	2.0826525
$A_{6,0}$	0.9872447	$A_{1,6}$	-0.5184313

- Para  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ , se estima el valor de  $\beta = \frac{2\varphi}{\pi} = \frac{2\pi}{\pi 2} = 1$ 
  - $G_0 = A_{0,0} + A_{1,0}\beta + A_{2,0}\beta^2 + A_{3,0}\beta^3 + A_{4,0}\beta^4 + A_{5,0}\beta^5 + A_{6,0}\beta^6 = 1.09$
  - $G_1 = A_{0,1} + A_{1,1}\beta + A_{2,1}\beta^2 + A_{3,1}\beta^3 + A_{4,1}\beta^4 + A_{5,1}\beta^5 + A_{6,1}\beta^6 = 0.69$ 
    - $Q = 1 + 1.464 \left( \frac{a}{c} \right)^{1.65} = 1 + 1.464 \left( \frac{0.4}{0.8} \right)^{1.65} = 1.466$
    - $M_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2Q}} (3G_1 - G_0) - \frac{24}{5} = -1.107$
    - $M_2 = 3$
    - $M_3 = \frac{6\pi}{\sqrt{2Q}} (G_0 - 2G_1) + \frac{8}{5} = -1.788$
  - $G_2 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left( \frac{16}{15} + \frac{1}{3}M_1 + \frac{16}{105}M_2 + \frac{1}{12}M_3 \right) = 0.548$
  - $G_3 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left( \frac{32}{35} + \frac{1}{4}M_1 + \frac{32}{315}M_2 + \frac{1}{20}M_3 \right) = 0.465$

- $G_4 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left( \frac{256}{315} + \frac{1}{5} M_1 + \frac{256}{3465} M_2 + \frac{1}{30} M_3 \right) = 0.411$
- Para  $\varphi = 0$ , se estima el valor de  $\beta = \frac{2\varphi}{\pi} = \frac{2}{\pi}(0) = 0$ 
  - $G_0 = A_{0,0} + A_{1,0}\beta + A_{2,0}\beta^2 + A_{3,0}\beta^3 + A_{4,0}\beta^4 + A_{5,0}\beta^5 + A_{6,0}\beta^6 = 0.878$
  - $G_1 = A_{0,1} + A_{1,1}\beta + A_{2,1}\beta^2 + A_{3,1}\beta^3 + A_{4,1}\beta^4 + A_{5,1}\beta^5 + A_{6,1}\beta^6 = 0.128$ 
    - $Q = 1 + 1.464 \left( \frac{a}{c} \right)^{1.65} = 1 + 1.464 \left( \frac{0.4}{0.8} \right)^{1.65} = 1.466$
    - $N_1 = \frac{3\pi}{\sqrt{Q}} (2G_0 - 5G_1) - 8 = 0.69$
    - $N_2 = \frac{15\pi}{\sqrt{Q}} (3G_1 - G_0) + 15 = -4.239$
    - $N_3 = \frac{3\pi}{\sqrt{Q}} (3G_0 - 10G_1) - 8 = 2.549$
  - $G_2 = \frac{\sqrt{Q}}{\pi} \left( \frac{4}{5} + \frac{2}{3} N_1 + \frac{4}{7} N_2 + \frac{1}{2} N_3 \right) = 0.308$
  - $G_3 = \frac{\sqrt{Q}}{\pi} \left( \frac{4}{7} + \frac{1}{2} N_1 + \frac{4}{9} N_2 + \frac{2}{5} N_3 \right) = 0.220$
  - $G_4 = \frac{\sqrt{Q}}{\pi} \left( \frac{4}{9} + \frac{2}{5} N_1 + \frac{4}{11} N_2 + \frac{1}{3} N_3 \right) = 0.171$

Entonces,

$$K_I^{\varphi=\frac{\pi}{2}} = 17.32 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

$$K_I^{\varphi=0} = 13.94 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

- *Cilindro - fisura semi - elíptica superficial externa en dirección circunferencial*

$$K_I = G_0 \left[ \frac{PR_i^2}{R_0^2 - R_i^2} \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \text{ [MPa, mm]}$$

Donde,

- $A_{i,0}$ . Empleando la Tabla C.15 del anexo C y cumpliendo las relaciones:  $t/R_i = 0.05$ ,  $a/c = 0.5$ ,  $a/t = 0.05$ , se seleccionan los factores  $A_{i,0}$  (ver Tabla 2.10).

Tabla 2.10. Factores  $A_{i,0}$  obtenidos de la Tabla C.15 del estándar

Factores	
$A_{0,0}$	0.8776607
$A_{1,0}$	-0.6729719
$A_{2,0}$	3.7721411
$A_{3,0}$	-6.5209060
$A_{4,0}$	6.3377934
$A_{5,0}$	-3.7028038
$A_{6,0}$	0.9872447

- Para  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ , se estima el valor de  $\beta = \frac{2\varphi}{\pi} = \frac{2\pi}{\pi 2} = 1$

$$G_0 = A_{0,0} + A_{1,0}\beta + A_{2,0}\beta^2 + A_{3,0}\beta^3 + A_{4,0}\beta^4 + A_{5,0}\beta^5 + A_{6,0}\beta^6 = 1.090$$

- Para  $\varphi = 0$ , se estima el valor de  $\beta = \frac{2\varphi}{\pi} = \frac{2}{\pi}(0) = 0$

$$G_0 = A_{0,0} + A_{1,0}\beta + A_{2,0}\beta^2 + A_{3,0}\beta^3 + A_{4,0}\beta^4 + A_{5,0}\beta^5 + A_{6,0}\beta^6 = 0.878$$

- $Q = 1 + 1.464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.65} = 1 + 1.464 \left(\frac{0.4}{0.8}\right)^{1.65} = 1.466$

Entonces,

$$K_I^{\varphi=\frac{\pi}{2}} = 8.56 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

$$K_I^{\varphi=0} = 6.97 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

## 2.12 Determinación del ratio de tenacidad

La expresión 1.46 presentada en el capítulo anterior describe al ratio de tenacidad que relaciona el factor de intensidad de tensiones debido a cargas principales  $K_I^P$ , el factor de intensidad de tensiones debido a cargas secundarias y esfuerzos residuales  $K_I^{SR}$  y la tenacidad a la fractura del material  $K_{mat}$ . Cabe señalar que en el presente caso de estudio, no se cuenta con cargas secundarias ni esfuerzos residuales. A continuación se determina el ratio de tenacidad para la fisura longitudinal y circunferencial.

$$K_r = \frac{K_I^P + \phi K_I^{SR}}{K_{mat}} \quad [MPa\sqrt{m}]$$

- *Cilindro - fisura semi - elíptica superficial externa en dirección longitudinal*

Para  $\varphi = \frac{\pi}{2}$

$$K_r = \frac{K_I^{\varphi=\frac{\pi}{2}}}{K_{mat}} = \frac{17.32}{141.12} = 0.123$$

Para  $\varphi = 0$

$$K_r = \frac{K_I^{\varphi=0}}{K_{mat}} = \frac{13.94}{141.12} = 0.099$$

- *Cilindro - fisura semi - elíptica superficial externa en dirección circunferencial*

Para  $\varphi = \frac{\pi}{2}$

$$K_r = \frac{K_I^{\varphi=\frac{\pi}{2}}}{K_{mat}} = \frac{8.56}{141.12} = 0.061$$

Para  $\varphi = 0$

$$K_r = \frac{K_I^{\varphi=0}}{K_{mat}} = \frac{6.97}{141.12} = 0.049$$

### 2.13 Diagnóstico empleando diagrama de falla FAD

Como ya se ha mencionado en el capítulo anterior, el diagrama FAD es considerado como una herramienta de análisis gráfico que define una curva límite de falla a través de dos métodos:

- Emplear la expresión 1.47 (ecuación 9.30 - Capítulo 9 del estándar).

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

- Utilizar la expresión 1.50 (ecuación 9.27 - Capítulo 9 del estándar).empleando valores experimentales del material.

$$K_r = \left( \frac{E \varepsilon_t}{L_r \sigma_{ys}} + \frac{(L_r)^3 \sigma_{ys}}{2 E \varepsilon_t} \right)^{-1/2}$$



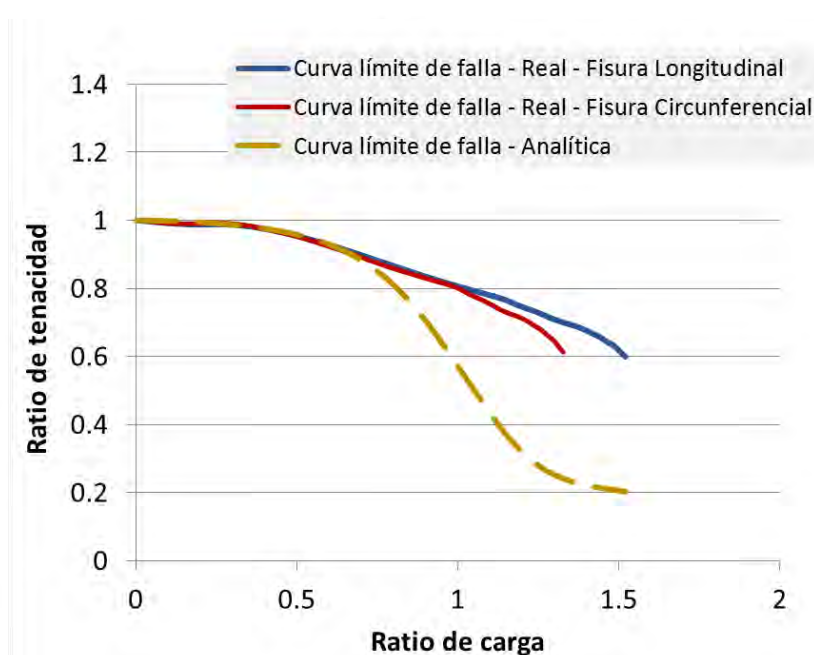
A continuación la Tabla 2.11 muestra los valores experimentales, reales, ratio de carga y tenacidad. Los valores experimentales ( $\varepsilon_{es}$ ,  $\sigma_{es}$ ) son obtenidos de la curva esfuerzo-deformación del material (Informe de laboratorio – Anexo 1). Los valores reales ( $\varepsilon_t$ ,  $\sigma_t$ ) son los valores experimentales modificados empleando las expresiones 1.48 y 1.49. El ratio de carga se define como la relación del esfuerzo real  $\sigma_t$  y el esfuerzo de fluencia  $\sigma_{ys}$ . Asimismo, los ratios de tenacidad se definen empleando la expresión 1.47 y 1.50.

Tabla 2.11. Valores experimentales, reales, ratio de carga y tenacidad para la elaboración del curva límite de falla

Valores experimentales		Valores reales		Ratio de carga		Ratio de tenacidad		
				$L_r = \frac{\sigma_t}{\sigma_{ys}}$		Ec.1.50		Ec.1.47
				Fisura Longitud.	Fisura Circunf.	Fisura Longitud	Fisura Circunf	Analítico
$\varepsilon_{es}$	$\sigma_{es}$	$\varepsilon_t$	$\sigma_t$	$\sigma_{ys} = 660MPa$	$\sigma_{ys} = 756MPa$	$K_r$	$K_r$	$K_r$
0	0	0.000	0.0	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000
0.5	103	0.499	103.5	0.157	0.137	0.988	0.990	0.997
1	212	0.995	214.1	0.324	0.283	0.985	0.992	0.985
1.5	318	1.489	322.8	0.489	0.427	0.957	0.970	0.961
2	415	1.980	423.3	0.641	0.560	0.916	0.936	0.913
2.5	500	2.469	512.5	0.777	0.678	0.874	0.898	0.830
3	575	2.956	592.3	0.897	0.783	0.836	0.864	0.709
3.5	650	3.440	672.8	1.019	0.890	0.801	0.833	0.545
4	720	3.922	748.8	1.135	0.990	0.770	0.804	0.389
4.5	750	4.402	783.8	1.188	1.037	0.750	0.782	0.332
5	780	4.879	819.0	1.241	1.083	0.732	0.762	0.286
5.5	800	5.354	844.0	1.279	1.116	0.717	0.745	0.263
6	820	5.827	869.2	1.317	1.150	0.703	0.730	0.245
6.5	845	6.297	899.9	1.364	1.190	0.690	0.716	0.230
7	860	6.766	920.2	1.394	1.217	0.678	0.703	0.223
7.5	870	7.232	935.3	1.417	1.237	0.668	0.691	0.218
8	880	7.696	950.4	1.440	1.257	0.658	0.680	0.214
8.5	885	8.158	960.2	1.455	1.270	0.649	0.669	0.212
...	...	...	...	...	...	...	...	...
11.5	900	10.885	1003.5	1.520	1.327	0.203	0.613	0.599

La figura 2.2 muestra las curvas límites de falla, las cuales están basadas en los valores determinados que registrados en la Tabla 2.11. Las curva limite denominadas

reales son obtenidas en base a los datos experimentales y son dos ya que el tanque durante los ensayos en laboratorio ha exhibido diferentes esfuerzos de fluencia en dirección longitudinal y circunferencial, como se describió en Tabla 2.6. El análisis de una fisura longitudinal emplea el esfuerzo de fluencia en dirección circunferencial y viceversa. Asimismo, es notoria la diferencia entre la curva analítica y las reales. La curva límite empleando la expresión 1.47 es conservadora, sin embargo, las curvas reales nos entregan un resultado acorde al comportamiento del material, lo cual contribuye a la toma de decisiones sobre la operatividad del componente.



*Fig. 2.2. Curvas límites de falla empleando valores experimentales y expresiones analíticas*

Para realizar la evaluación de la integridad estructural empleando el diagrama FAD del tanque de GNV, se requiere recuperar los valores determinados en los acápites anteriores. Para ello, y como resumen de los cálculos desarrollados, la Tabla 2.12 presenta los resultados de las variables significativas que han sido tratadas en el presente capítulo. Existe un especial interés en los valores estimados de ratio de carga (Acápite 2.10) y ratio de tenacidad (Acápite 2.12), ya que éstas definen el estado del tanque en el diagrama FAD.

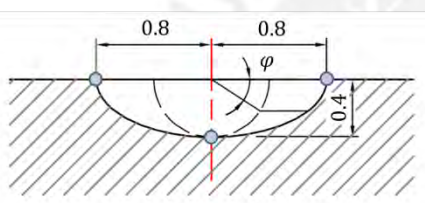
Tabla 2.12. Resumen de los resultados de las variables requeridas para el diagnóstico mediante el diagrama FAD.

Variable		Tabla/Acápite	Resultados	Unidad
<b>Material</b>				
Esf. de fluencia – Circunferencial	$\sigma_{ys}$	Tabla 2.6	<b>660</b>	MPa
Esf. de fluencia – Longitudinal	$\sigma_{ys}$	Tabla 2.6	<b>756</b>	MPa
Tenacidad a la fractura	$K_{mat}$	Tabla 2.8	<b>141.12</b>	MPa.m <sup>-0.5</sup>
<b>Fisura Longitudinal</b>				
<b>Esfuerzo</b>				
Membrana	$P_m$	Tabla 2.8	<b>557.28</b>	MPa
Flexión	$P_f$	Tabla 2.8	<b>15.00</b>	MPa
Referencia	$\sigma_{ref}$	Acápite 2.9	<b>562.79</b>	MPa
<b>Factor de intensidad de tensiones</b>				
$\varphi = \pi/2$	$K_I^{\varphi=\pi/2}$	Acápite 2.11	<b>17.32</b>	MPa.m <sup>-0.5</sup>
$\varphi = 0$	$K_I^{\varphi=0}$	Acápite 2.11	<b>13.94</b>	MPa.m <sup>-0.5</sup>
<b>Ratio</b>				
Carga	$L_r^P$	Acápite 2.10	<b>0.853</b>	---
Tenacidad para $\varphi = \pi/2$	$K_r$	Acápite 2.12	<b>0.123</b>	---
Tenacidad para $\varphi = 0$	$K_r$	Acápite 2.12	<b>0.099</b>	---
<b>Fisura Circunferencial</b>				
<b>Esfuerzos</b>				
Membrana	$P_m$	Tabla 2.8	<b>271.33</b>	MPa
Flexión	$P_f$	Tabla 2.8	<b>0.00</b>	---
Referencia	$\sigma_{ref}$	Acápite 2.9	<b>271.33</b>	MPa
<b>Factor de intensidad de tensiones</b>				
$\varphi = \pi/2$	$K_I^{\varphi=\pi/2}$	Acápite 2.11	<b>8.56</b>	MPa.m <sup>-0.5</sup>
$\varphi = 0$	$K_I^{\varphi=0}$	Acápite 2.11	<b>6.97</b>	MPa.m <sup>-0.5</sup>
<b>Ratio</b>				
Carga	$L_r^P$	Acápite 2.10	<b>0.359</b>	---
Tenacidad para $\varphi = \pi/2$	$K_r$	Acápite 2.12	<b>0.061</b>	---
Tenacidad para $\varphi = 0$	$K_r$	Acápite 2.12	<b>0.049</b>	---

Los valores de ratio obtenidos,  $L_r^P$  y  $K_r$ , definen las coordenadas para ubicar los puntos de evaluación que representa el estado de la integridad del componente en el

diagrama FAD. La Tabla 2.13 describe las coordenadas de los puntos de evaluación de los dos frentes de propagación,  $\varphi = \pi/2$  y  $\varphi = 0$ , para la fisura longitudinal y circunferencial. Asimismo, la figura 2.3 muestra los puntos de la Tabla 2.3 ubicados en el diagrama FAD, donde se aprecia que dichos puntos se ubican por debajo de la curva límite y de acuerdo a las regiones vistas en el acápite 1.2.2.2 (ver figura 1.11), éstos se encuentran en la zona segura. Por tanto, se puede inferir que las fisuras longitudinal y circunferencial bajo una presión constante de 20 MPa, no comprometen la integridad del componente evaluado.

Tabla 2.13. Puntos de evaluación de los frentes de propagación de las fisuras longitudinal y circunferencial.

Fisura		Abscisa	Ordenada		
Frente de propagación	Orientación	$L_r^P$	$K_r$		
	Longitudinal	$\varphi = \pi/2$	0.853	0.123	
		$\varphi = 0$	0.853	0.099	
	Circunferencial	Orientación		$L_r^P$	$K_r$
		$\varphi = \pi/2$	0.359	0.061	
		$\varphi = 0$	0.359	0.049	

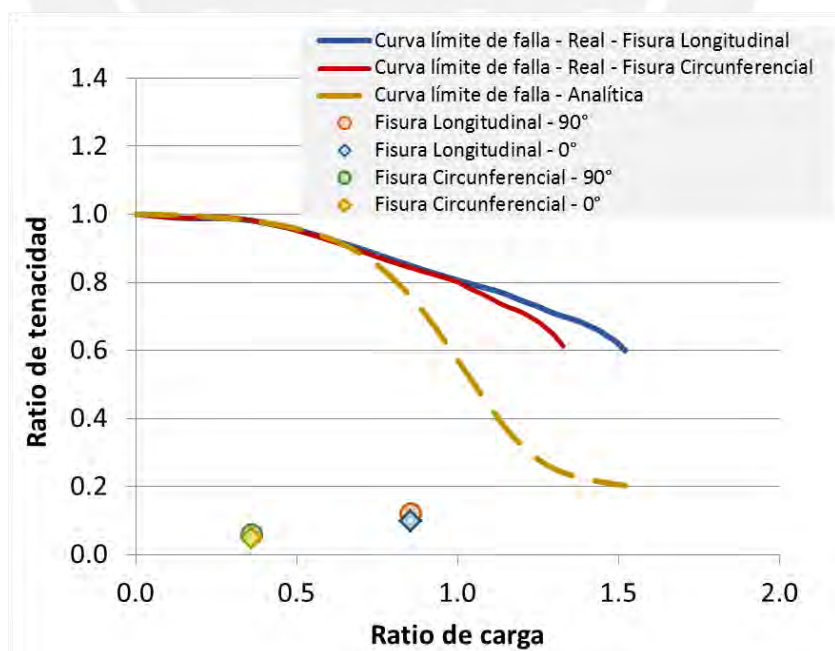


Fig. 2.3. Evaluación de integridad del tanque de GNV-1 empleando el diagrama FAD

### Capítulo 3

#### Simulación del mecanismo de fractura en cilindros presurizados

En la actualidad la simulación numérica es una herramienta muy útil para resolver diferentes tipos de problemas en la ingeniería. Las estimaciones realizadas por el método de Elementos Finitos MEF han resultado ser muy acertadas; sin embargo el tratamiento de un caso real empleando este método numérico contempla diferentes etapas, tales como identificación de las variables a estudiar, definición de modelos geométricos, discretización de los mismos, definición de las restricciones y cargas, el propio análisis y finalmente interpretación de resultados.

Por otro lado, el estándar API 579 propone técnicas y metodologías para evaluar la integridad estructural de un componente presurizado que presenta algún tipo de defecto que esté contemplado en el mismo estándar. En el caso concreto de defectos tipo fisura, API 579 provee de una serie de expresiones analíticas de variables esenciales para determinar el comportamiento del componente fisurado, sin embargo, el propio estándar sugiere que algunas de éstas pueden ser determinadas empleando simulación numérica.

La aplicación de la simulación numérica es considerada necesaria para el presente trabajo, dado que en el capítulo 4 se evaluará la condición activa de una fisura y se requiere determinar ciertas variables para cada uno de los incrementos de tamaño de la fisura. Por lo expuesto, en el presente capítulo se identifican los parámetros susceptibles de ser evaluados mediante simulación numérica, luego se desarrollan modelos computacionales y se realiza el análisis mediante simulación. Finalmente, se comparan los resultados obtenidos con los resultados analíticos alcanzados en el capítulo anterior. La contrastación de los resultados permite concluir sobre la factibilidad de emplear los modelos computacionales desarrollados para la evaluación de integridad estructural del tanque de GNV-1.

### 3.1 Identificación de parámetros para la simulación numérica

Después de implementar un procedimiento de evaluación de integridad estructural de fisuras en cilindros presurizados en el marco del estándar API 549 en el capítulo 2, es posible señalar que las variables o parámetros que pueden ser abordados por simulación son:

- *Estado de esfuerzos en las inmediaciones de la fisura*
- *Factor de intensidad de tensiones*

El factor de intensidad de tensiones ha sido seleccionado para ser evaluado por simulación numérica. Las expresiones para determinar el estado de esfuerzos en la pared del tanque son amigables y están basadas en conceptos clásicos de resistencia de materiales, mientras que las expresiones para calcular los factores de intensidad dependen de ciertos coeficientes, algunos de ellos definidos por nuevas expresiones y otros están contenidos en tablas. Las tablas de coeficientes están diseñadas para ciertas relaciones geométricas y resulta que no siempre las dimensiones del componente y la fisura no cumplen con exactitud dichas relaciones, así que el usuario tendrá que practicar cálculos de interpolación. Por lo mencionado, se puede inferir que los cálculos de intensidad de tensiones resultan pesados y tomando en consideración que la fisura será evaluada en una etapa activa (capítulo 4), los cálculos analíticos serían abundantes y cargados.

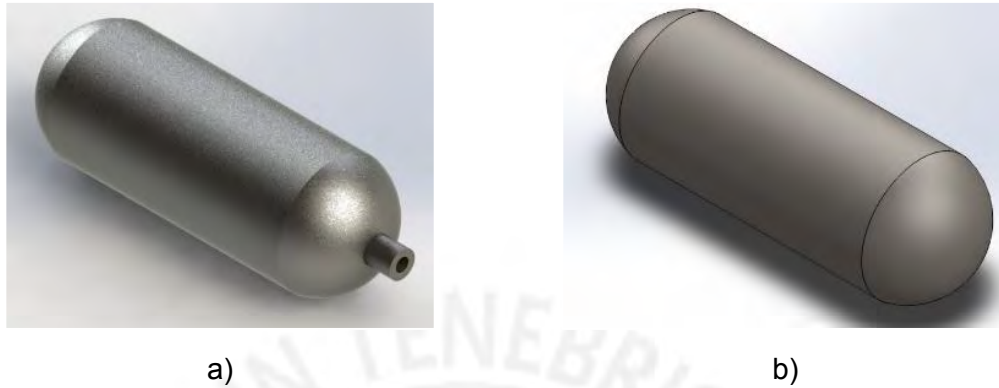
### 3.2 Desarrollo de modelos computacionales

Se considera que un modelo computacional es aquel que inicia con un modelo geométrico implementado en algún software de dibujo (CAD), el mismo que es discretizado en pequeños elementos, también denominado como enmallado, y luego este modelo discretizado recibe las condiciones de contorno.

#### 3.2.1 Definición de modelos geométricos

Las características geométricas del componente y de la fisura fueron descritas en el acápite 2.2 y 2.3 del capítulo 2, específicamente, la información está contenida en la Tabla 2.1 y 2.3. La figura 3.1 muestra el modelo geométrico desarrollado con todos los detalles constructivos, sin embargo este modelo ocasionaría un costo computacional adicional e innecesario. Por ello, se desarrolla un modelo geométrico depurado que prescinde del soporte roscado de válvula y busca la simetría completa del tanque. Esta

consideración es posible ya que el lugar de evaluación se concentra en la cilíndrica y media del tanque (ubicación de la fisura).



*Fig. 3.1. a) Modelo 3D del tanque de GNV. b) Modelo idealizado del tanque para el análisis mediante simulación.*

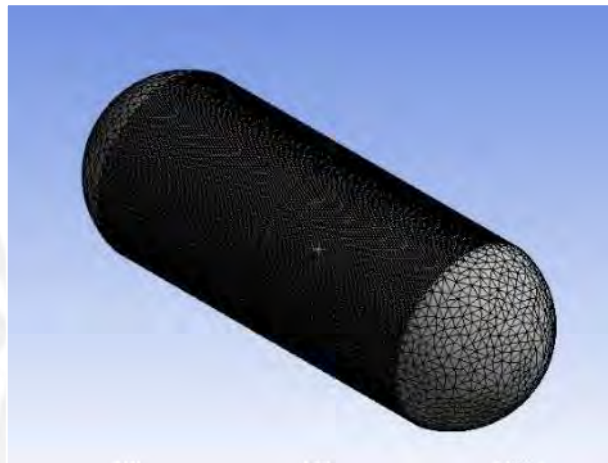
Los modelos geométricos puede ser desarrollados por diferentes software de dibujo asistido por computadora (CAD siglas en inglés), en el presente trabajo se emplea Inventor Profesional, de la familia de productos de Autodesk.

### **3.2.2 Discretización de modelos.**

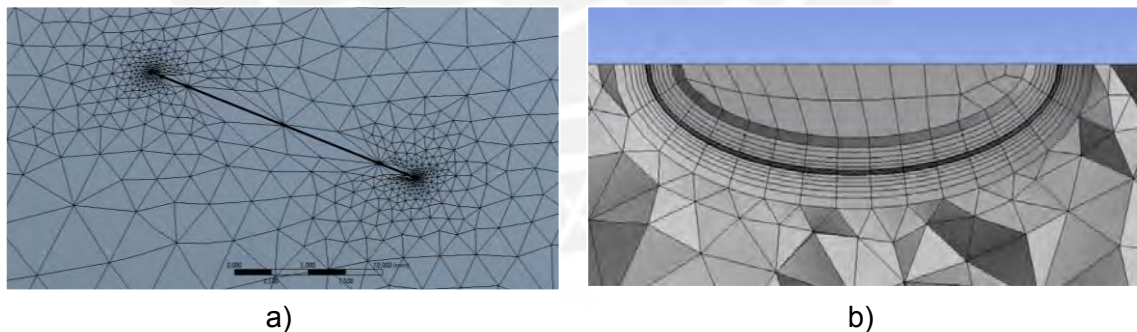
El método de los Elementos Finitos divide un continuo en pequeños elementos y a este proceso se llama discretización del modelo. Los elementos se encuentran unidos por medio de puntos comunes llamados nodos, de tal manera que las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo rigen también el comportamiento de cada elemento. El número de elementos depende de la exactitud con las que se desee obtener un resultado, una malla fina provee mejores resultados. Sin embargo; incrementar el número de elementos de forma excesiva provoca el incremento del costo computacional. Por ello, una buena práctica es afinar la malla en las zonas relevantes y realizar un análisis de convergencia, el cual consiste en ajustar la malla hasta que los resultados convergen alrededor de un cierto valor independientemente del número de elementos

La figura 3.2 muestra al modelo discretizado con alrededor de 155 000 elementos y dado que la fisura se encuentra en la superficie cilíndrica del tanque, no es necesario tener una malla muy densa en los domos (extremos del tanque), pero si se presta un especial interés en la malla alrededor de la fisura. La figura. 3.3a muestra que la

cabeza de la fisura sobre los extremos es envuelta por elementos tetraédricos especiales bajo un arreglo circular, asimismo en la figura 3.3b se aprecia que el frente de la fisura (semi elipse) es discretizado en quince tramos en una vista en corte. El tamaño de los elementos designados que se encuentran en las proximidades de la fisura alcanza un valor promedio de 0.025 mm, mientras que los elementos en las zonas alejadas alcanzan aproximadamente los 5 mm.



*Fig. 3.2. Modelo idealizado enmallado*



*Fig. 3.3. Malla alrededor de la fisura: a) sobre la cabeza en los extremos, b) sobre el frente de propagación (vista en corte)*

El software ANSYS es empleado para la discretización y el análisis, el cual es ampliamente reconocido y empleado para resolver problemas estructurales, térmicos y de dinámica de fluidos. A continuación la Tabla 3.1 muestra un resumen de las características de la malla de acuerdo a la metodología propia del software.



*Tabla 3.1. Resumen de las características de la malla*

Malla de la fisura	Medida	Unidad
Tipo de fisura	Semi - elíptica	---
Radio menor de fisura	0.4	mm
Radio mayor de fisura	0.8	mm
Contorno de malla	6 divisiones	---
Frente de fisura	16 partes	---
Fisura-contorno	0.025	mm
Malla general	Medida	Unidad
Método de mallado	Tetraedros	---
Tamaño de elemento	5	mm

### 3.2.3 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno están constituidas por las restricciones que son aquellas reacciones responsables de garantizar el equilibrio y de las cargas que son aquellas fuerzas conocidas impuestas sobre el modelo.

#### 3.2.3.1 Restricciones

Las restricciones impuestas sobre el modelo son el impedimento de la rotación de la superficie cilíndrica interna del tanque sobre su eje axial y el impedimento a la traslación en la dirección del mismo eje axial sobre la arista media circular, como se puede apreciar en la figura 3.4a. Ambas restricciones conjuntamente garantizan el equilibrio del modelo en las tres direcciones.

#### 3.2.3.2 Cargas

De acuerdo a las condiciones de operación registradas en el capítulo anterior (Acápites 2.4 - Tabla 2.4), el tanque de GNV opera sometido a una presión interna fluctuante cuyos valores máximo es de 20 MPa, cuando el tanque se encuentra lleno, y mínimo de 0.5 MPa, cuando el tanque requiere volver a ser cargado. Cabe señalar que el análisis se lleva a cabo utilizando la presión máxima de 20 MPa, ya que la fluctuación de la carga será de interés en el capítulo 4, donde se estudia el comportamiento de la fisura en una condición activa de crecimiento. La presión de 20 MPa es impuesta sobre todas las superficies internas del modelo, como lo muestra la figura 3.4b.

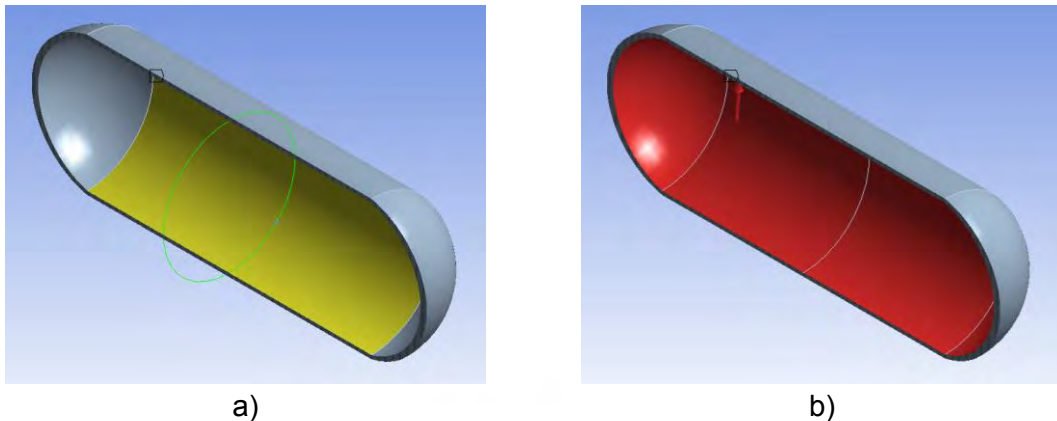


Fig. 3.4. a) Superficie y arista restringidas (rotación y traslación, respectivamente). b) Superficies donde se impone la presión interna

### 3.3 Análisis mediante simulación numérica

El análisis es del tipo estático estructural, donde las condiciones de contorno están constituidas por restricciones de rotación y traslación y una carga representada por la presión interna. Los resultados típicos que se pueden obtener del análisis estático estructural son desplazamientos, deformaciones y esfuerzos. La figura 3.5a muestra vistas seccionadas donde se aprecia la fisura enmallada con los esfuerzos resultantes sobre la misma. Los esfuerzos de von Mises más altos (color rojo) se ubican en el contorno de la fisura, también llamado frente de propagación, mientras que los esfuerzos más bajos (color azul) se registran en la cara de la fisura, justamente donde el material ha perdido continuidad debido a su presencia.

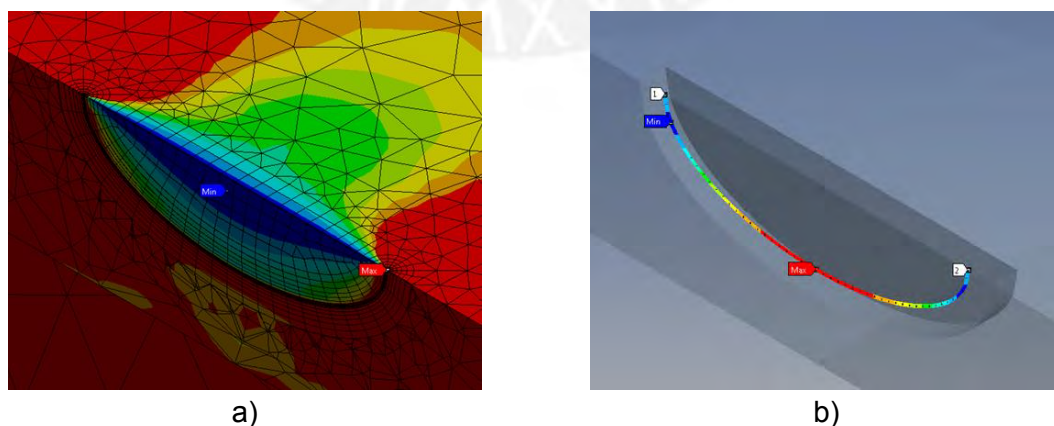
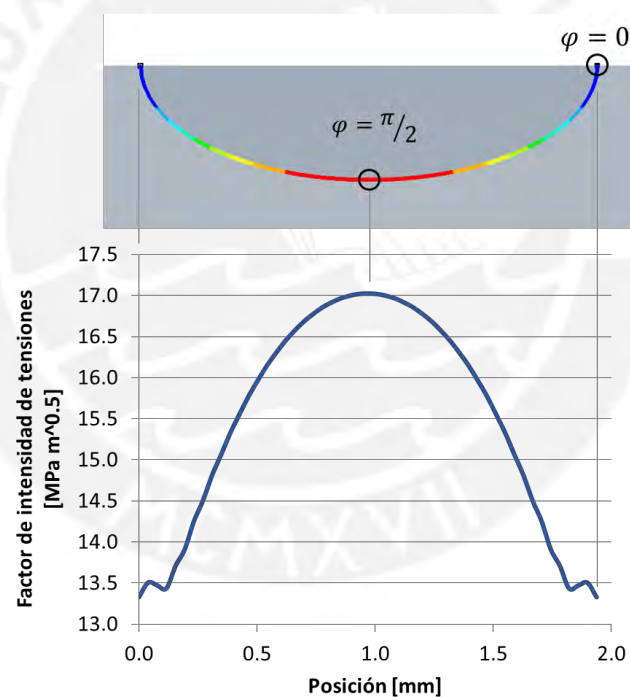


Fig. 3.5. a) Esfuerzos von Mises alrededor de la fisura. b) Resultados de factores de intensidad de tensiones sobre el frente de propagación.

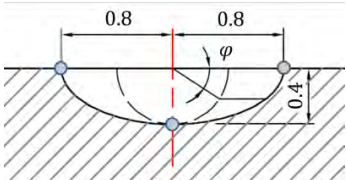
Por otro lado, la figura 3.5b muestra los resultados de los factores de intensidad de tensiones sobre el frente de propagación. Los valores más altos se ubican en el frente vertical de la fisura,  $\varphi = \pi/2$  (color rojo), mientras que los valores más bajos se registran en el frente superficial,  $\varphi = 0$  (color azul). Asimismo, la figura 3.6 contiene un gráfico de los valores del factor de intensidad de tensiones a lo largo de todo el frente de propagación de la fisura longitudinal. Cabe resaltar que la simulación computacional da una clara ventaja respecto a los procedimientos analíticos, ya que como se puede apreciar en la figura 3.6, es posible determinar el valor de los factores de cada nodo contenido en frente de propagación. Los cálculos efectuados mediante las expresiones analíticas en el capítulo 2 alcanzaron resultados únicamente para dos nodos del frente, para  $\varphi$  igual a 90 y 0 grados (Acápite 2.11 y Tabla 2.12).



*Figura 3.6 Resultados del factor de intensidad de tensiones a lo largo del frente de propagación de la fisura longitudinal.*

Se evaluaron los casos de la fisura en dirección longitudinal y circunferencial, mantienen las mismas condiciones geométricas y condiciones de contorno para ambos casos. La Tabla 3.2 muestra un resumen de los resultados de la evaluación empleando simulación numérica.

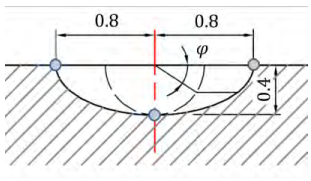
Tabla 3.2. Resultados de los FIT mediante simulación numérica.

Fisura	Orientación	Medida	Unidad
	Longitudinal	$K_I$	
	$\varphi = \pi/2$	13.33	$\text{MPa}\cdot\text{m}^{-0.5}$
	$\varphi = 0$	17.03	$\text{MPa}\cdot\text{m}^{-0.5}$
	Circunferencial	$K_I$	
	$\varphi = \pi/2$	8.45	$\text{MPa}\cdot\text{m}^{-0.5}$
	$\varphi = 0$	6.90	$\text{MPa}\cdot\text{m}^{-0.5}$

### 3.4 Comparación empleando resultados analíticos

La contrastación de los resultados obtenidos mediante simulación numérica con los resultados analíticos alcanzados en el capítulo anterior tiene por finalidad evaluar la factibilidad de emplear los modelos computacionales desarrollados para la evaluación de integridad estructural del tanque de GNV-1. La Tabla 3.3 complementa los resultados de la Tabla 3.2 al incluir los resultados analíticos del factor de intensidad de tensiones obtenidos y documentados en la Tabla 2.12 del capítulo 2. La diferencia entre los resultados no supera el 5 por ciento y en promedio se alcanza el 1.8 por ciento, lo cual conlleva a presumir que los modelos computacionales desarrollados son factibles para complementar la evaluación de integridad del tanque de GNV determinando el factor de intensidad de tensiones, el cual es una de las variables susceptible de ser estimada mediante simulación numérica de acuerdo al propio estándar y un factor esencial para el diagnóstico de la idoneidad del componente para continuar en servicio.

Tabla 3.3. Comparación de los FIT obtenidos por simulación y analíticamente.

Fisura	Orientación	Analítico	Simulación	Diferencia [%]
		[ $\text{MPa}\cdot\text{m}^{-0.5}$ ]		
	Longitudinal	$K_I^{API}$	$K_I^{ANSYS}$	$(K_I^{API} - K_I^{ANSYS})/K_I^{API}$
	$\varphi = \pi/2$	17.32	17.02	1.7
	$\varphi = 0$	13.94	13.49	3.2
	Circunferencial	$K_I^{API}$	$K_I^{ANSYS}$	$(K_I^{API} - K_I^{ANSYS})/K_I^{API}$
	$\varphi = \pi/2$	8.56	8.45	1.3
	$\varphi = 0$	6.97	6.90	1.0

## Capítulo 4

### Evaluación de la Integridad Estructural de un Tanque Fisurado de GNV

El incremento de unidades vehiculares que emplean como combustible el gas natural ha generado la necesidad de tomar conocimiento de las normas peruanas y de criterios técnicos para mantener el buen desempeño de los equipos involucrados. Adicionalmente, en la actualidad se cuenta con estándares internacionales que colaboran con el diagnóstico y la toma de decisiones cuando un determinado componente presenta algún tipo de defecto durante su funcionamiento. API 579 es uno de estos estándares con amplio reconocimiento que describe técnicas de evaluación de integridad de equipos presurizados. Por otro lado, como fue señalado en el primer capítulo, se cuenta con una técnica simple y muy conocida para estudiar la propagación de fisuras, conocida como modelo de Paris, cuya expresión fue descrita por la ecuación 1.51. El modelo de Paris, ampliable para la gran mayoría de materiales, vincula la velocidad de propagación, definida por la relación de pequeños incrementos de tamaño de la fisura y el número de ciclos de carga, con la diferencia del factor de intensidad de tensión máximo y mínimo, afectada por constantes empíricas.

Por lo expuesto, el presente capítulo evalúa la integridad estructural de un tanque de GNV tipo 1 que presenta una fisura superficial en condición activa de propagación, para lo cual se emplea el procedimiento implementado en el capítulo 2 y los modelos computacionales desarrollados en el capítulo 3. Cabe señalar que a lo largo del presente trabajo se ha evaluado a la fisura en dos diferentes orientaciones, longitudinal y circunferencial, sin embargo el estudio de propagación, objetivo del presente capítulo, se centra en el comportamiento de fisura longitudinal. La misma que ha demostrado ser la que compromete en mayor medida a la integridad del tanque, de acuerdo a los resultados obtenidos en los capítulos precedentes.

#### **4.1 Caso de estudio: Tanque fisurado de GNV-1**

El presente capítulo emplea un tanque de GNV tipo 1 de uso común en el parque automotriz peruano en la actualidad, el cual posee 920 mm de longitud, 323 mm de diámetro externo y un espesor de pared de 8.25 mm. El tanque se encuentra sometido a presión interna fluctuante cuyos valores máximo es de 200 bar, cuando se encuentra lleno, y mínimo es de 5 bar, cuando se encuentra vacío. Asimismo, se califica de no agresivo el medio de trabajo (maletera del auto) y que la temperatura promedio de operación es de 15°C. Adicionalmente, se asume que se ha detectado una pequeña fisura superficial, en condición de propagación activa, de forma semi elípticas en dirección longitudinal sobre la superficie exterior cilíndrica del tanque, cuya profundidad y longitud son 0.4 mm y 1.6 mm, respectivamente.

#### **4.2 Procedimiento de evaluación: Método B - Nivel 3**

De acuerdo a lo expuesto en los capítulos previos, el Nivel 3 exige información detallada del caso a analizar y emplea técnicas avanzadas por ingenieros especialistas para el cálculo de esfuerzos. A diferencia del Nivel 2, se evalúa fisuras en una fase activa de crecimiento y emplea el diagrama FAD, cuya curva de falla se obtiene a partir de valores reales del comportamiento esfuerzo-deformación del material, los cuales son obtenidos mediante ensayos de laboratorio.

Por otro lado, las evaluaciones efectuadas en los capítulos 2 y 3 fueron practicadas sobre el mismo caso de estudio descrito en el punto anterior (Acápites 4.2). Salvo las consideraciones de la fluctuación de la presión de 0.5 a 20 MPa y la propagación de la fisura, todos los demás puntos han sido evaluados. Por ello, en el presente capítulo se emplea el procedimiento implementado y los resultados analíticos del capítulo 2, así como los modelos desarrollados durante el capítulo 3, cuyos resultados han demostrado la viabilidad de ser empleados para determinar los factores de intensidad de tensiones.

Para abordar el estudio de la propagación de la fisura contemplando la carga fluctuante de la presión interna, tema central del presente capítulo, se emplea el modelo de Paris definido por la siguiente expresión, la misma que ya fue presentada por la ecuación 1.51.

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m$$

Donde  $da/dN$  representa la velocidad de propagación, crecimiento de la fisura entre número de ciclos, la cual es proporcional a la amplitud de los valores factores de intensidad de tensiones  $\Delta K$ , mientras que  $C$  y  $m$  son constantes empíricas. Atendiendo a que el tanque opera en un ambiente no agresivo y que el esfuerzo de fluencia del material supera los 552 MPa, se ha designado que las variables  $C$  y  $m$  sean  $1.36 (10^{-7})$  y 2.25, respectivamente, de acuerdo a sugerencias que propone el estándar.

### 4.3 Análisis de propagación de la fisura

El análisis de la propagación de la fisura consiste en actualizar el tamaño de la fisura con pequeños incrementos tomando en cuenta dos condiciones: el valor del incremento no debe superar el 0.5% del tamaño de fisura y a partir de las dimensiones iniciales de la fisura, determinar un número mínimo de ciclos para el análisis. Ambas condiciones garantizan que los incrementos de la amplitud  $\Delta K$  no varíen drásticamente en el tiempo y mitigar el error de cálculo en cada ciclo de evaluación. Estimar el valor de factor de intensidad de tensiones para cada incremento de la fisura podría ser una tarea tediosa si se emplea las expresiones y tablas de los anexos del estándar, es por ello que el empleo de la simulación resulta una alternativa viable y atractiva, capaz de determinar el factor de intensidad de tensiones a lo largo de todo el frente de la fisura para los diferentes tamaños con relativa facilidad.

#### 4.3.1 Crecimiento mínimo de la fisura

Las expresiones 4.1 y 4.2 permiten actualizar el tamaño de la fisura con pequeños incrementos tal que el valor de dicho incremento no supere el 0.5% de la profundidad y longitud de la fisura, respectivamente.

$$\Delta a \leq 0.5\% a \quad \text{Ec. 4.1}$$

$$\Delta c \leq 0.5\% c \quad \text{Ec. 4.2}$$

Las expresiones permiten disminuir el error de cálculo cuando se determina el número mínimo de ciclos, además, se las debe emplear para cada nueva dimensión obtenida, logrando de esta manera la actualización del tamaño de la fisura. A continuación se

determina los incrementos necesarios a partir de las dimensiones originales de la fisura.

$$\Delta a \leq 0.5\% a = 0.005 (0.4) = 0.002 \text{ mm}$$

$$\Delta c \leq 0.5\% c = 0.005 (0.8) = 0.004 \text{ mm}$$

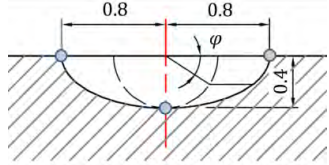
#### 4.3.2 Mínimo número de ciclos

La expresión 4.3, basada en la expresión 1.51 que define el modelo de Paris, emplea los coeficientes definidos en el acápite 4.2, y a partir de ella, se despeja el término que presenta el número de ciclos, además los términos  $da$  y  $dN$  son reemplazados por términos  $\Delta a$  y  $\Delta N$ . Ahora, despejado el término  $\Delta N$ , como lo muestra la ecuación 4.4, se reemplaza el término del incremento mayor del tamaño de fisura obtenido en el acápite anterior, asimismo, se reemplaza el término de la amplitud  $\Delta K$  después de determinar mediante simulación numérica los factores de intensidad de tensiones máximo y mínimo para el tamaño de fisura original, 0.4 mm de profundidad y 1.6 mm de longitud, como lo muestra la Tabla 4.1. Finalmente, reemplazados todos los términos de la expresión 4.4, se obtiene que el mínimo número de ciclos en dirección de la profundidad y la longitud de la fisura son 26 y 89, respectivamente. Así que, con la finalidad de definir el menor de estos valores y trabajar con un número de amigable, se ha seleccionado el mínimo número de ciclos igual a 25 ciclos.

$$\frac{da}{dN} = 1.36(10^{-7})(\Delta K)^{2.25} \quad \text{Ec. 4.3}$$

$$\Delta N \leq \frac{\Delta a}{1.36(10^{-7})(\Delta K)^{2.25}} \quad \text{Ec. 4.4}$$

Tabla 4.1. FIT del tamaño de fisura original obtenidos por simulación

Fisura	Orientación	$K_{m\acute{a}x}$	$K_{m\acute{i}n}$	$\Delta K = K_{m\acute{a}x} - K_{m\acute{i}n}$ [MPa.m <sup>-0.5</sup> ]
		[MPa.m <sup>-0.5</sup> ]		
Fisura longitudinal		20 MPa	0.5 MPa	
	$\varphi = \pi/2$	17.02	0.43	16.59
	$\varphi = 0$	13.49	0.34	13.15



$$\Delta N \leq \frac{0.002}{1.36(10^{-7})(16.59)^{2.25}} \approx 26$$

$$\Delta N \leq \frac{0.004}{1.36(10^{-7})(13.15)^{2.25}} \approx 89$$

De acuerdo al estándar (F.5.2 – Anexo F), la evaluación de propagación solo debe ser realizada si el valor de la variación de los factores de intensidad de tensiones es lo suficientemente grande para generar crecimiento de la fisura. Las expresiones 4.5 a 4.7 definen el mínimo valor de la amplitud  $\Delta K_{th}$  que se debe superar para que amerite la evaluación.

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad \text{para} \quad \Delta K > \Delta K_{th} \quad \text{Ec. 4.5}$$

$$\frac{da}{dN} = 0.0 \quad \text{para} \quad \Delta K \leq \Delta K_{th} \quad \text{Ec. 4.6}$$

$$\Delta K_{th} = 7 - \left(1 - 0.85 \frac{K_{min}}{K_{máx}}\right) [MPa\sqrt{m}] \quad \text{Ec. 4.6}$$

De acuerdo a los valores obtenidos en la Tabla 4.1, se observa en el siguiente cálculo que el mínimo valor de la amplitud  $\Delta K_{th}$  es igual a  $60.2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-0.5}$  y por consiguiente menor a 16.59 y 13.15, con lo cual se justifica el estudio de propagación.

$$\Delta K_{th} = 7 - \left(1 - 0.85 \frac{K_{min}}{K_{máx}}\right) = 7 - \left(1 - 0.85 \frac{0.43}{17.02}\right) = 6.02 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

#### 4.3.3 Evaluación de la propagación de la fisura empleando el diagrama FAD

A partir de una fisura semi-elíptica inicial impuesta sobre la superficial del tanque en dirección longitudinal, cuya profundidad y longitud son 0.4 y 1.6 mm respectivamente, se evalúa la propagación de la fisura actualizando su tamaño empleando la expresión 4.3 y el diagramas FAD del material elaborado en el acápite 2.13 (ver figura 2.2). Definido el mínimo número de ciclos a 25 y determinados los factores de intensidad de tensiones máximo (presión interna máxima) y mínimo (presión interna mínima) para los dos frentes de propagación de la fisura inicial,  $\varphi = 90^\circ$  (punto más profundo en dirección del espesor del material) y  $\varphi = 0^\circ$  (puntos sobre la superficie), se evalúa la variación del tamaño de fisura en ambas dimensiones. Dicha variación es sumada a

las dimensiones iniciales y de esta forma se actualiza el tamaño de fisura, posteriormente se procede a estimar los nuevos factores de intensidad de tensiones máximo y mínimo, para  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , obteniendo una nueva variación del tamaño, el cual volverá ser actualizando y de esta forma el proceso continua. Se observa la razón por la cual el empleo de la simulación numérica cobra importancia, dado que las dimensiones de la fisura varían en cada iteración, sería necesario encontrar los factores de intensidad de tensiones para cada actualización a través de las expresiones analíticas, haciendo de las actividades de cálculo muy pesadas.

La Tabla 4.2 muestra un resumen del número de ciclos cada 250 y los tamaños de fisura actualizados, además de los valores del ratio de carga y tenacidad respectivos. Asimismo, de forma gráfica, el resultado de la propagación de la fisura dentro del diagrama FAD es ilustrado en la figura 4.1, donde se aprecia la evolución de la propagación en ambas direcciones. La curva de color verde representa el comportamiento de la fisura que se propaga en dirección radial a través del espesor de pared del tanque, mientras que la curva roja representa la evolución del tamaño de la fisura sobre la superficie del tanque.

*Tabla 4.2. Propagación de la fisura por ciclo.*

Número de ciclos	Semieje menor	Semieje mayor	Ratio de carga	Ratio de tenacidad	
				$90^\circ$	$0^\circ$
$N$	$a$ (mm)	$c$ (mm)	$L_r$	$K_r$	$K_r$
0	0.4	0.8	0.8527	0.1206	0.0956
250	0.4189	0.8112	0.8527	0.1222	0.0980
500	0.4384	0.8230	0.8528	0.1238	0.1006
750	0.4584	0.8356	0.8528	0.1253	0.1032
1 000	0.4790	0.8489	0.8528	0.1269	0.1059
1 250	0.5002	0.8630	0.8529	0.1284	0.1086
1 500	0.5219	0.8780	0.8529	0.1300	0.1112
1 750	0.5443	0.8937	0.8530	0.1315	0.1136
2 000	0.5673	0.9102	0.8530	0.1330	0.1160
2 250	0.5908	0.9275	0.8530	0.1349	0.1191
2 500	0.6151	0.9459	0.8531	0.1364	0.1216
...	...	...	...	...	...
15000	8.25	10.7	0.8742	0.3922	0.5909

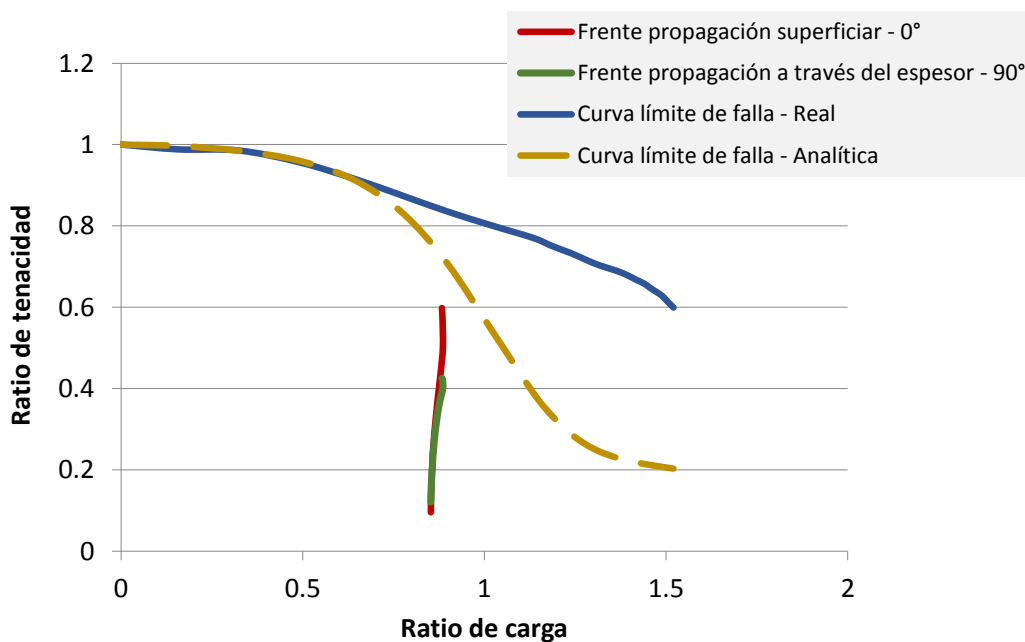


Fig. 4.1. Evaluación de la propagación de la fisura en dos frentes empleando el diagrama FAD.

El análisis de propagación finaliza cuando la fisura alcanza su tamaño crítico y esto sucede cuando alguna de las dimensiones alcanza la curva límite del diagrama FAD. Como puede apreciarse en la figura 4.1, la evaluación ha concluido y tanto la curva roja como la verde no alcanzan el tamaño crítico y esto se debe a que se produjo la condición de *fuga antes de falla*. El análisis de la figura 4.2, permitirá entender dicha condición.

La figura 4.2 muestra la evolución el factor de intensidad de tensiones de la fisura con el incremento del tamaño de la fisura, tanto en profundidad como en longitud. Cuando la profundidad de la fisura alcanza los 8.25 mm el análisis de propagación termina, ya que este valor es igual al espesor de pared del tanque. La dimensión de la fisura en dirección del espesor ha alcanzado traspasar todo el material produciendo un agujero en el componente y consecuentemente la fuga del contenido del mismo. Bajo esta condición, en el tanque se produce la fuga del fluido de su interior, pero no falla de forma catastrófica.

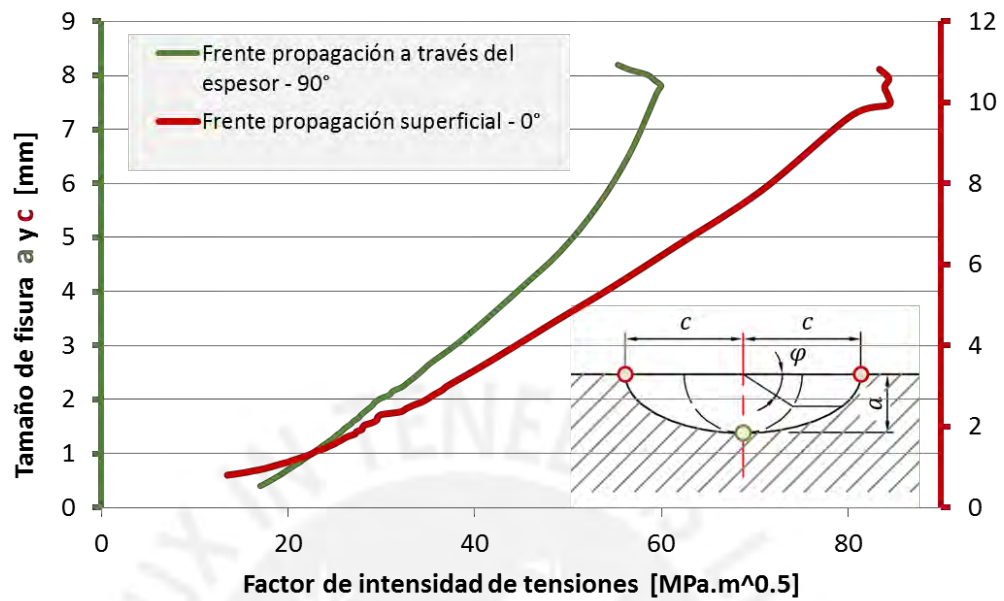


Fig. 4.2. Relación del tamaño de la fisura y el factor de intensidad de tensiones

La figura 4.3 muestra la relación entre el tamaño de la fisura y el número de ciclos. La fisura alcanza los 8.25 mm de profundidad y 22 mm (aprox.) de longitud alrededor de los 15 000 ciclos.

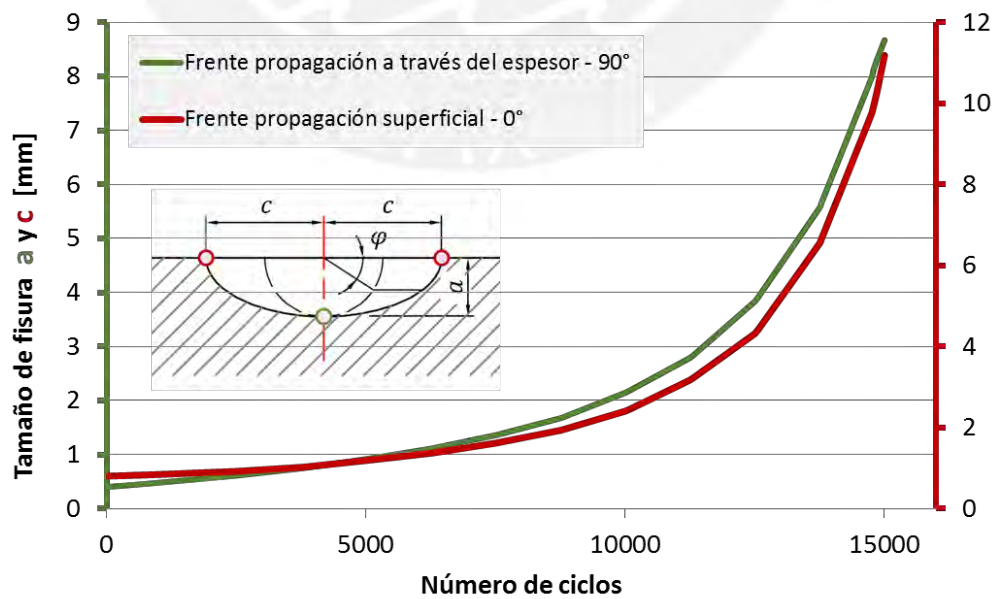


Fig. 4.3. Relación del tamaño de la fisura y el número de ciclos

La figura 4.4 muestra gráficamente el estado de propagación de la fisura dentro del diagrama FAD (izquierda) y la evolución del tamaño de fisura sobre sus dos frentes de propagación (derecha). El punto A representa el estado final de crecimiento de la fisura a través del espesor y ya que se encuentra por debajo de la curva límite se afirma que no ha alcanzado el tamaño crítico necesario para que ocurra la falla inminente. Mientras que, del otro lado de la figura, el punto A' muestra que el tamaño alcanzado es de 8.25 mm, el mismo valor del espesor de pared del tanque. Esta condición de haber alcanzado el espesor del tanque sin llegar al tamaño crítico, se conoce como *fuga antes que falla*. Asimismo, el punto B constituye el estado final alcanzado por la fisura sobre la superficie del tanque, cuya longitud final es de aproximadamente 22 mm (punto B'). Alcanzada la condición de fuga, el gas sería liberado por la propia fisura y la presión interna descendería y muy probablemente la propagación se detendría, sin embargo de continuar el proceso de propagación, el punto C representa el estado crítico para que ocurra una falla del tanque la cual podría ocurrir con una longitud alrededor de 13 mm (punto C'), si se evalúa con la curva límite analítica, pero si se evalúa con la curva límite obtenida con datos experimentales (punto D), el tamaño superaría los 13 mm (punto D').

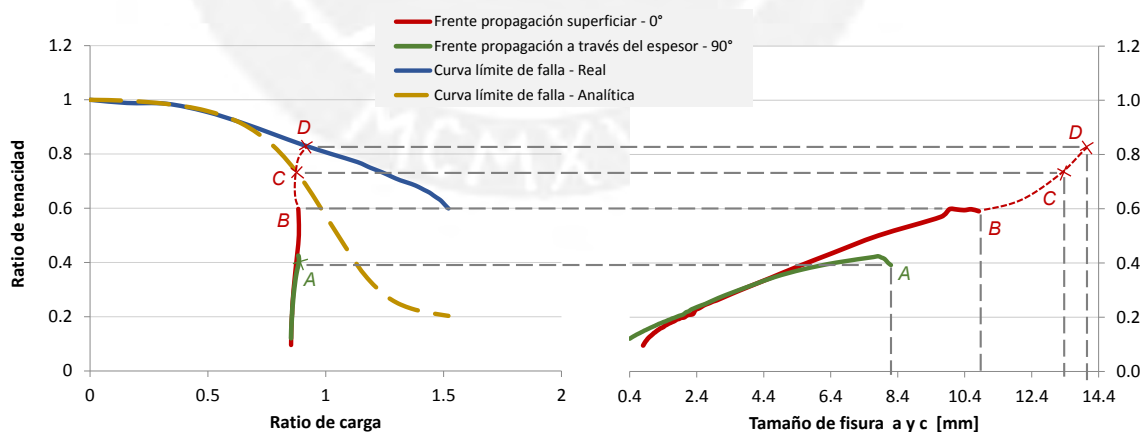


Fig. 4.4. Análisis gráfico del estado de propagación de la fisura dentro del diagrama FAD (izquierda) y la evolución del tamaño de fisura (derecha).

#### 4.4 Discusión de los resultados obtenidos empleando criterios de evaluación de la norma peruana

En el presente acápite se describe brevemente algunas recomendaciones y aspectos técnicos importantes de la norma peruana, los mismos que sirven como marco de discusión de los resultados obtenidos.

La Norma Técnica Peruana NTP 111.013 denominada “*Cilindros de alta presión para almacenamiento de gas natural utilizado como combustible para vehículos automotores*”, indica los siguientes aspectos importantes:

- La vida de útil, durante la cual los cilindros son seguros, debe ser especificada por el fabricante y no debe superar los 20 años.
- Los cilindros deben estar diseñados para ser llenados hasta 1000 veces por año, a una presión establecida de 20 MPa (200 bar) y a una temperatura establecida de 15°C.
- Durante los ensayos de *fuga antes de rotura*, los cilindros deben ser sometidos a presión cíclica con una tasa que no supere los 10 ciclos por minuto y todos ellos deben fallar por fuga o superar los 45 000 ciclos de presión.

De acuerdo a los resultados obtenidos, a la fisura inicial le toma 15 000 ciclos penetrar el espesor del tanque y de considerar que el ciclo de llenado de un vehículo es de 1000 veces al año, lo que representa menos de 3 veces por día, se puede estimar que la falla por fuga ocurriría aproximadamente a los 15 años de servicio.

$$1000 \frac{\text{ciclos}}{\text{año}} \cdot 15 \text{ años} = 15\,000 \text{ ciclos}$$

La probabilidad de que a los 15 años se produzca una falla por fuga genera una situación de alerta, ya que de acuerdo a lo señalado por la norma, un fabricante de tanques, del mismo tipo al evaluado, podría emplear el tiempo máximo de 20 años para especificar la vida útil de sus productos.

Por otro lado, dentro de los ensayos que solicita la norma se encuentra aquel donde se somete a los tanques a presión cíclica y se espera que la falla sea por fuga. Similar condición de falla se ha determinado en el presente estudio, como puede ser apreciado en la figura 4.4.

Asimismo, NTP 111.017 “Revisión periódica de cilindros tipo I para gas natural vehicular (GNV)”, indica lo siguiente:

- La frecuencia para la revisión periódica obligatoria programada es de 5 años, siendo la primera revisión a los 5 años de la fecha de fabricación.
- Dentro de los defectos frecuentemente encontrados que pueden afectar la vida útil del cilindro se encuentra las estrías y fisuras. Las mismas que son representadas mediante las imágenes extraídas de la norma y mostradas en la figura 4.5. Asimismo, la norma las define de la siguiente manera:
  - Estría: Corte con falta de material en la superficie del cilindro que disminuye el espesor de las paredes del cilindro, cuyo límite de condena es cuando la longitud de corte sea mayor que el 5% del espesor de la pared del cilindro
  - Fisura: Grieta interna o externa, cuya presencia no es admitida.

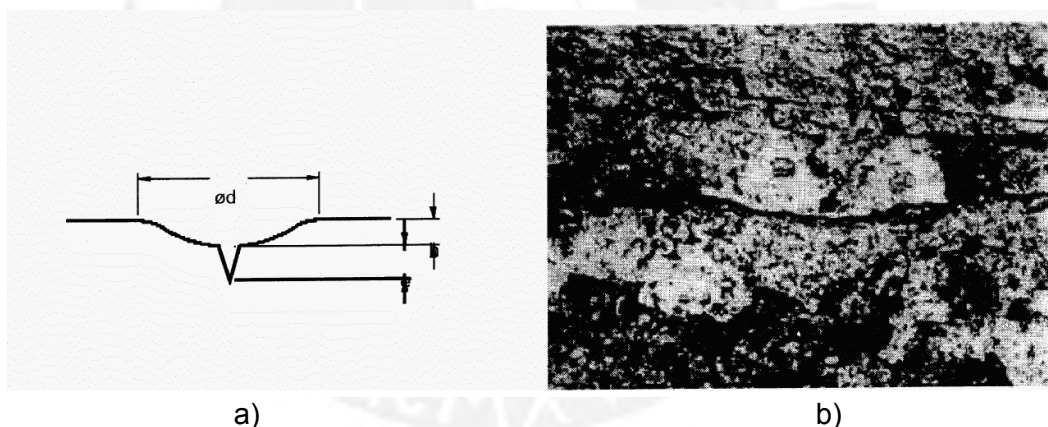


Fig. 4.5. a) Estría. b) Fisura. Imágenes extraídas de NTP111.017.

Si bien es cierto que se había mencionado acerca de una situación de alerta, ésta tendría gran probabilidad de no llegar a suceder, ya que de acuerdo a lo señalado por NTP 111.017, se exige una revisión obligatoria programada a los 5 años. Así que, de cumplirse la revisión, se podría detectar a alguna fisura y en el caso de estudio del presente trabajo, se detectaría a la fisura con 2 mm de longitud y 1 mm de profundidad de acuerdo a los resultados obtenidos, los cuales son presentados en la figura 4.3.

Una adecuada inspección visual externa podría detectar la presencia de una fisura y, de acuerdo a NTP 111.017, condenar el tanque ya que este tipo de defectos no son

admitidos. Sin embargo, según las imágenes extraídas de la norma (ver figura 4.5), la figura que define a una fisura no es lo suficientemente clara, lo que podría provocar una inadecuada interpretación de este defecto, y quizá lo más importante, que el defecto denominado estría que se define como la ausencia de material y de acuerdo a la figura 4.5a, se la representa con un ángulo agudo. La representación y la definición de la estría contribuyen a que sea fácilmente confundida con una fisura. De presentarse una estría o fisura en el tanque analizado, ésta podría poseer una longitud de 0.4 mm, cercana al 5% del espesor de pared de 8.25 mm, y el tanque no sería condenado.





## Conclusiones

1. La implementación de un procedimiento de evaluación para cilindros presurizados, basados en el estándar API 579, ha permitido analizar un tanque de GNV que presenta un defecto tipo fisura, empleando métodos y técnicas respaldadas por la mecánica de fractura y la resistencia de materiales.
2. La caracterización del comportamiento de la fisura mediante la determinación del factor de intensidad de tensiones por métodos analíticos y simulación computacional produjo diferencias mínimas que en promedio alcanzan el 2%.
3. El desarrollo de modelos computacionales ha permitido estudiar el comportamiento de la fisura atendiendo la actualización de la misma mediante el incremento de sus dimensiones. Esta actividad es compleja y tediosa cuando se emplea expresiones analíticas, ya que éstas dependen de coeficientes contenidos en tablas las cuales están diseñadas para ciertas relaciones geométricas y que de no cumplir dichas relaciones el usuario tendría que practicar cálculos de interpolación.
4. Los resultados del estudio indican que un cilindro de GNV que presenta una fisura longitudinal semi elíptica de 0.4 mm de profundidad y 1.6 mm de longitud, produciría una falla por fuga aproximadamente a los 15 años. De acuerdo a NTP 111.013 se cumple que el componente esté diseñado para presentar la condición de fuga antes de falla. Asimismo, esta situación tiene posibilidades de ocurrir ya que el tiempo vida útil de un tanque, que debe ser indicado por los proveedores de acuerdo a norma, podría ser hasta 20 años. Sin embargo, se esperaría que la fisura sea detectada oportunamente en las revisiones periódicas, ya que éstas son obligatorias cada 5 años de acuerdo a la NTP 111.017.

## Bibliografía

- [1] Osinergmin – Gerencia de Fiscalización de GNV  
2015 “Consumo acumulado de GNV”  
Link: [http://gasnatural.osinerg.gob.pe/contenidos/uploads/GFGN/con\\_acu\\_gnv.pdf](http://gasnatural.osinerg.gob.pe/contenidos/uploads/GFGN/con_acu_gnv.pdf)
- [2] Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía  
2011 “Informe quincenal de la SNMPE”. Octubre 2011.  
Link: <http://www.snmpe.org.pe/informes-y-publicaciones-snmpe/informes-quincenales/sector-hidrocarburos/el-gas-natural-vehicular-gnv-actualizado-octubre-2011.html>
- [3] Juan Salinas  
2014 *Periódico El Deber*. “Tanques de 300.000 autos a GNV del país serán revisados”. Bolivia.  
Link: [http://gasnatural.osinerg.gob.pe/contenidos/uploads/GFGN/con\\_acu\\_gnv.pdf](http://gasnatural.osinerg.gob.pe/contenidos/uploads/GFGN/con_acu_gnv.pdf)
- [4] Cámara Peruana del Gas Natural Vehicular.  
2015 “Estadísticas 2015”  
Link: [http://cpqnv.org.pe/?page\\_id=10522](http://cpqnv.org.pe/?page_id=10522)
- [5] INDECOPI – NTP 111.013  
2004 “GAS NATURAL SECO. Cilindro de alta presión para el almacenamiento de gas natural utilizado como combustible para vehículos automotores”. (1° Ed.)
- [6] INDECOPI – NTP 111.017  
2004 “GAS NATURAL SECO. Revisión periódica de cilindros tipo I para gas natural vehicular (GNV)”. (1° Ed.)
- [7] Cicero. S  
2010 “Structural Integrity Assessment in Europe: FITNET FFS Procedure”
- [8] API 579 (2007)  
2007 “Recommended Practice 579 Fitness For Service.” American Petroleum Institute. Washington, D.C.
- [9] Guerrero M. A  
2006 “Análisis a fractura de recipientes a presión fabricados en aceros de alta resistencia HSS. pp 305-310” Anales de Mecánica de la Fractura Vol. I. 2006
- [10] Alegre J. M.  
2009 “Aplicación del Procedimiento ASME-API 579 para el Diseño en Fatiga de Vasijas de Alta Presión Bobinadas. pp 640 – 647” Anales de Mecánica de la Fractura 26, Vol. 2. 2009.
- [11] Alva Dávila, Fortunato  
2006 “Análisis de esfuerzos y deformaciones un tanque cilíndrico para gas natural vehicular pp 65 – 76” TECNIA 16
- [12] ALIANZA SENA / ASOPARTES

- 2011 *Módulo de generalidades del gas natural y su aplicación en el campo automotor.* Curso de Diagnóstico y Sincronización Electrónica Con énfasis en vehículos convertidos a Gas Natural Vehicular.  
Link: <http://es.scribd.com/doc/63940726/2-Parte-Curso-Sena-Asopartes-Gas-Natural#scribd>
- [13] CILBRAS  
2013 *Cilindros de alta presión*. Brochure de cilindros de alta presión.
- [14] Directiva N° 004-2010-MTC/15  
2010 *“Régimen de autorización y funcionamiento de los centros de revisión periódica de cilindros”*.
- [15] Rey Santiago, David  
2013 *Evaluación de Integridad Según FITNET*. Trabajo fin de Master. Universidad de Oviedo.
- [16] ASME  
2013 *Section XI – Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components – Brochure “Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC)”*
- [17] r-desk  
2012 <http://www.r-desk.co.uk/r5-procedure>
- [18] r-desk  
2012 <http://www.r-desk.co.uk/r6-procedure>
- [19] K. H. Schwalbe, J. Herrens, U. Zerbst.  
2002 *EFAM GTP 02–the GKSS test procedure for determining the fracture behavior of materials*, Germany.
- [20] U., Kim, Y.J., Brocks, W., Cornec, A., Heerens, J., & Amstutz, H  
1998 *EFAM ETM 97 - the ETM method for assessing the significance of crack-like defects in engineering structures, comprising the versions ETM 97/1 and ETM 97/2 (GKSS--98/E/6)*. Germany
- [21] Uwe Zerbst, Manfred Schödel, Stephen Webster, Robert Ainsworth  
2007 *Fitness-for-Service Fracture Assessment of Structures Containing Cracks. A Workbook based on the European SINTAP/FITNET Procedure*

### **Normas y estándares de referencia**

- [22] NTP 111.014  
2004 *GAS NATURAL SECO. Componentes del equipo de conversión para vehículos que funcionan con gas natural vehicular (GNV)*

[23] NTP 111.015

2004 *GAS NATURAL SECO. Montaje de equipos completos en vehículos con gas natural vehicular (GNV)*

[24] NTP 111.016

2004 *GAS NATURAL SECO. Dispositivos de sujeción para cilindros en vehículos con gas natural vehicular (GNV).*

[25] ISO 7225

1994 *Gas Cylinder. Precautionary Labels.*

[26] ISO 9809-1

1999 *Gas Cylinders. Refillable Seamless Steel. Gas Cylinders. Design, Construction and Testing. Part 1: Quenched and Tempered Steel Cylinders with Tensile Strength less than 1 100 MPa.*

[27] ISO 9809-2

2000 *Gas Cylinders. Refillable Seamless Steel. Gas Cylinders. Design, Construction and Testing. Part 2: Quenched and Tempered Steel Cylinders with Tensile Strength Greater than 1 100 MPa.*

[28] ISO 9809-3

2000 *Gas Cylinders. Refillable Seamless Steel. Gas Cylinders. Design Construction and Testing. Part 3: Normalized steel cylinders*

[29] ASME

2001 *Rules for construction of pressure vessel-Section VIII, División I.*

[9] IRAM 2526

1997 *Cilindros de acero sin costura para gases Permanentes*

[30] ISO 7866

1999 *Gas Cylinders Refillable Seamless Aluminum Alloy Gas Cylinders--Design, Construction and Testing*

