



## Análisis de Falla de una Válvula para Uso Petrolero, Mediante el Método de Elementos Finitos.

Héctor Sanzi <sup>(1)(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Grupo Ingeniería Estructural, Universidad Tecnológica Nacional  
Facultad Regional Haedo - París 532 Haedo (1706) - Buenos Aires Argentina

<sup>(2)</sup> Tecsa Ingeniería

Lima 1141 Piso 6to. Dto. A Capital Federal (1073) - Buenos Aires, Argentina  
e-mail: [tecsaing@fibertel.com.ar](mailto:tecsaing@fibertel.com.ar)

### Resumen

En la actualidad, las Técnicas Avanzadas de Análisis, a través de un detallado “Stress Analysis”, utilizando el Método de Elementos Finitos y la aplicación de la Mecánica de Fractura, como herramientas de ingeniería, junto con el conocimiento del comportamiento de los materiales y la capacidad para detectar fisuras o discontinuidades, a partir de la utilización de los Ensayos No Destructivos, incluyendo la Emisión Acústica - permiten garantizar la seguridad estructural de los componentes a lo largo de su vida útil.

En este camino los Códigos de Aplicación, tanto en el diseño como en el servicio, son utilizados para llevar a cabo un estudio de integridad

En este trabajo se presenta un procedimiento de cálculo para evaluar la integridad estructural de un componente contenedor de presión que posee una fisura superficial no pasante, en donde se aplica el Código API 579 <sup>(1)</sup>, utilizando el Método de Elementos Finitos y la Mecánica de Fractura.

### 1. Introducción

Las plantas industriales de alta capacidad tecnológica, tales como petroquímicas, refinerías, químicas, alimenticias, metalúrgicas, nucleares, etc., poseen componentes contenedores de presión, cañerías y equipos que operan en condiciones extremas. En la actualidad, la tecnología alcanzada en el diseño de dichas plantas, permiten operar a sus equipos a elevadas presiones y temperaturas o en situaciones desfavorables en cuanto a la degradación o corrosión de los materiales, pero manteniendo los límites de seguridad y controles requeridos por la planta.

En los últimos años han surgido nuevas especificaciones destinadas a la adecuada selección de los materiales y a cumplir con requerimientos de análisis más exigentes, los cuales se incorporan en el diseño, la fabricación y la inspección.

Por otro lado, el correcto funcionamiento de dichas plantas exige del control de especialistas con un alto grado de conocimiento y preparación, con el fin de mantener y asegurar operativos a sus equipos.

El control de las variables operativas del proceso, el aseguramiento de la calidad, el mantenimiento planificado de los equipos y el conocimiento de la vida remanente de los equipos instalados en la planta, son los factores preponderantes que hacen a la planta segura.

En este trabajo se presenta un estudio de integridad realizado sobre una válvula de uso petrolero, que surge ante la necesidad de verificar su estado estructural, debido a aparición y detección de una fisura interna sobre el cuerpo de la misma.

## **2. Procedimiento de Evaluación de Integridad Estructural**

El diseño de un componente contenedor de presión, realizado por un ingeniero especialista, debe contemplar el Diseño Óptimo que minimice potenciales aumentos de tensiones, tales como discontinuidades, soldaduras, abusamientos, interferencias, imperfecciones, etc..

El nivel máximo o crítico de tensiones, a partir del cual se produce el colapso o la probable aparición de fisuras, considerando todos los estados de cargas presentes, debe ser evaluado a través de un correcto procedimiento de análisis, partiendo de una apropiada selección de los materiales y teniendo en cuenta todas las variables operativas del equipo.

El adecuado tratamiento del tema, ayuda al diseñador a seleccionar el material, calcular niveles máximos de tensiones y complementado con otras especialidades, dependiendo del equipo que se trate, permite prever dimensiones de fisuras o fallas no convencionales y tolerables que puedan producir el colapso del componente, con la finalidad de asegurar la integridad del mismo, a lo largo de su vida útil.

Es decir en determinadas circunstancias es posible dimensionar determinadas imperfecciones admisibles en el proceso de fabricación, respaldada por un detallado estudio de integridad, independiente de otros ensayos realizados en laboratorio.

Dependiendo del tipo de equipo que será instalado y de los requerimientos de la planta, el diseñador deberá considerar y evaluar los diferentes factores de riesgo que se incluirán en su análisis.

Adicionalmente, un detallado estudio de costos y de seguridad, permitirán acceder a la correcta selección del código de diseño a utilizar, que no solo depende del tipo de cálculo empleado, sino fundamentalmente de la seriedad de las consecuencias que implicaría la rotura o el colapso del componente dentro de la planta.

Los controles sobre los materiales, durante el proceso de compra, y las inspecciones necesarias a realizar durante el proceso de fabricación, complementan el análisis de selección.

Bajo este concepto, la aplicación de Códigos de Diseño, tales como ASME Sección VIII División 1<sup>(2)</sup> o 2<sup>(3)</sup>, ASME/ANSI B31<sup>(4)</sup>, resultan propicio para su utilización.

Para reactores u otros equipos especiales, instalados en una planta de proceso, que cumplan un rol fundamental de operación o de seguridad, el diseño se podrá complementar con otras especialidades, con la intención de evitar o minimizar eventuales fallas durante el servicio, tales como:

- a.- Conocimiento del material en función de la temperatura  $\Rightarrow$  Fragilización - Creep
- b.- Existencia de defectos producto de la Fabricación  $\Rightarrow$  Mecánica de Fractura
- c.- Comportamiento del componente ante cargas dinámicas y/o fatiga
- d.- Tensiones Residuales

Para estos casos, incorporando un detallado "Stress Analysis", utilizando Técnicas de Elementos Finitos, es posible determinar el estado tensional y el campo de las deformaciones de un componente con un alto grado de exactitud.

La utilización de esta herramienta ingenieril permite determinar las tensiones actuantes en cualquier parte del componente y evaluar puntos o zonas con elevadas tensiones, que servirán para futuros controles durante el servicio. Un estudio de Significación de Defectos en donde se evalúan diferentes tamaños de fisuras posibles y admisibles, desarrolladas durante el Servicio, puede permitir al inspector tomar decisiones ante la detección de una probable falla o defecto.

En este camino, la utilización de las normas API 579 “Aptitud para el Servicio “FFS”<sup>(1)</sup> y API 581 “Implementación de Inspección Basada en Riesgo RBI”<sup>(5)</sup>, permiten evaluar el comportamiento estructural del componente.

El API 579<sup>(1)</sup>, puede ser usado para evaluar un componente contenedor de presión conteniendo algún tipo de daño, defecto o fisuras, durante el Servicio. Para el caso en donde se deba evaluar la integridad de un componente fisurado, el Código utiliza en el Nivel 2 y 3, el Criterio de Aceptación referido al “Diagrama de Aptitud Ante la Falla FAD”.

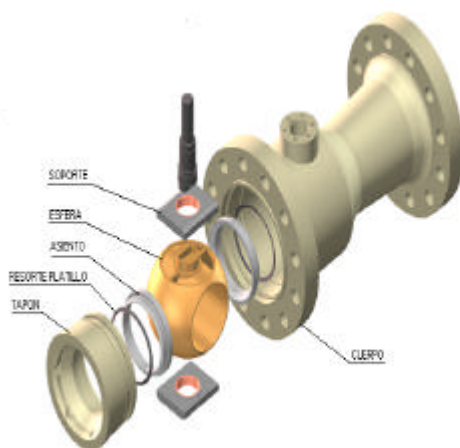
Este procedimiento presenta dos criterios de aceptación relacionado con la Fractura Inestable y Carga Límite o Colapso Plástico. En este se combinan los resultados del estado tensional del componente fisurado, obtenidos de un detallado “Stress Analysis” y los del Factor de Intensidad de Tensiones, utilizado en la Mecánica de Fractura.

En un estudio más completo, es posible encarar un análisis por RBI<sup>(5)</sup>, en donde se incorporan otros aspectos del componente, tales como el tipo de material, las condiciones de diseño y operativas en servicio, presencia de posibles fallas y sus consecuencias potenciales de accidentes, etc.

Una vez evaluado y aceptado el daño o defecto, el especialista deberá realizar un estudio de vida remanente, evaluando o estimando la situación extrema más desfavorable donde la fisura se hace inestable y produce el colapso del componente, permitiendo planificar la inspección adecuada, antes de su reparación o retiro.

### 3. Estudio de Integridad – Análisis de Falla

A continuación se presenta un estudio de integridad, que fuera realizado sobre una válvula del tipo esférica de uso petrolero, que surge ante la necesidad de verificar su estado estructural, como consecuencia de la detección de una fisura interna, ubicada en el cuerpo de la misma. En la Figura 1 se presenta un esquema general de la válvula.



**Figura 1. Esquema General de una Válvula Tipo Esférica**

El componente analizado corresponde a una válvula del tipo esférica, de Diámetro Nominal DN 12” Serie 600, pasaje reducido, fabricada según normas ANSI-API <sup>(6)</sup>.

En la etapa de inspección de la planta, se verificaron espesores, los cuales fueron obtenidos a partir de técnicas END por ultrasonido. Se tomaron valores mínimos y promedios de los mismos. Durante la medición se detectó la presencia de una pequeña fisura, en el interior del cuerpo de la válvula, orientada en la dirección longitudinal y no pasante.

La Simulación Computacional ofrece una herramienta ingenieril que permite conocer su integridad estructural del componente fisurado con un alto grado de exactitud, y en donde se incluye y se modela dicha fisura, aplicando los conceptos y alcances de la Mecánica de la Fractura.

Las condiciones operativas de cálculo se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 1. Condiciones Operativas**

<b>Presión Aplicada, Pa</b>	125 Kg/cm <sup>2</sup>
<b>Temperatura, Ta</b>	140 °C

Con el objeto de evaluar las cargas de flexión sobre las bridas extremos de la válvula, se realizó un estudio previo, a través de un “Stress Analysis”, utilizando el programa CAESAR <sup>(7)</sup>. Estos esfuerzos son introducidos al modelo a través de un sistema de vigas rígidas incluidos en los extremos de las bridas.

Las tensiones fluencia y rotura, son las que se indican en la Tabla 2:

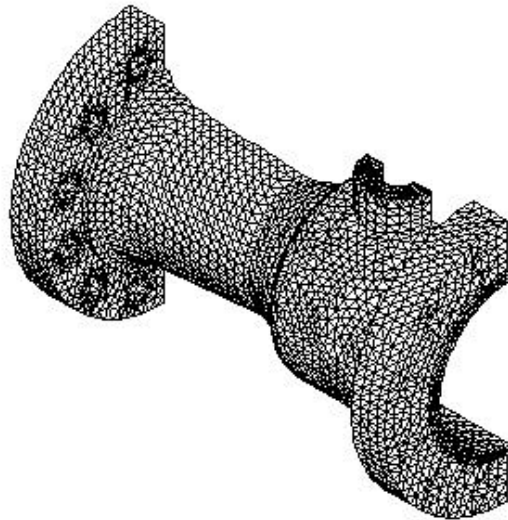
**Tabla 2. Propiedades Mecánicas de los Materiales de la Válvula**

<b>Item</b>	<b>Material</b>	<b>Tensión de Fluencia MPa</b>	<b>Tensión de Rotura MPa</b>
<b>Cuerpo</b>	<b>ASTM A 216 WCB</b>	253	492
<b>Brida Ciega</b>	<b>ASTM A 105</b>	253	492
<b>Espárragos</b>	<b>ASTM A 193 B7</b>	738	880

Se utilizan las tensiones admisibles del Código ASME Sección VIII División 1<sup>(2)</sup>, pero con el criterio de aceptación dado por el Apéndice 4 de la División 2<sup>(3)</sup>, o aplicando los Criterios de API 579 <sup>(1)</sup>, Nivel 2.

A partir de un modelo tridimensional de Elementos Finitos, con elementos sólidos tetraédricos (Tetra 4), de 3 grados de libertad por nodo, desplazamientos u (X), v (Y), w (Z), del programa COSMOS <sup>(8)</sup>, se determina el estado tensional y de las deformaciones del cuerpo de la válvula.

Teniendo en cuenta la simetría geométrica y de cargas del componente, según un plano transversal, solo se ha modelado la mitad del mismo, colocando las condiciones de borde que restringen los desplazamientos normales a dicho plano. Así quedó conformado el modelo de cálculo con 32004 elementos, Figura 2.



**Figura 2. Modelo de Elementos Finitos**

Para la evaluación de la fisura, se utilizan los lineamientos establecidos en la Norma API 579 <sup>(1)</sup>, a través de la utilización de las curvas “Failure Assessment Diagram FAD o (R6), en donde se determina el estado tensional del componente a partir de un detallado “Stress Analysis” y de la aplicación de la Mecánica de Fractura para evaluar el Factor de Intensidad de tensiones “Kaplic”, en el extremo de la fisura.

El procedimiento consiste en cumplir con los siguientes pasos,

**Paso 1: Identificación de la falla**

La falla fue detectada durante una inspección y se midió su tamaño por Ultrasonido. Esta es del tipo longitudinal ubicada sobre el cuerpo de la válvula. Las dimensiones son:

Defecto:	Tipo Longitudinal No Pasante
Longitud de la fisura:	15 mm
Profundidad:	1.5 mm

**Paso 2: Aplicación del FFS**

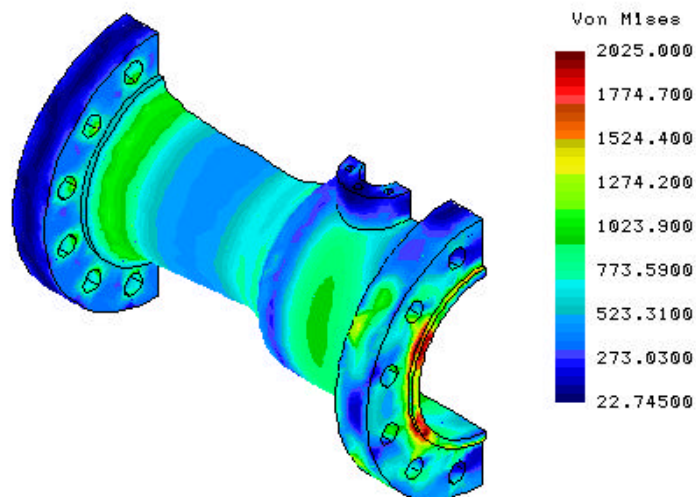
Se encara el proceso de evaluación de acuerdo a los lineamientos dados por el Nivel 2 del API 579 <sup>(1)</sup>, teniendo en cuenta el procedimiento empleado para detectar la fisura y documentación existente relacionada con el diseño y fabricación del componente.

**Paso 3: Datos requeridos para el análisis.**

Son los presentados anteriormente

**Paso 4: a.- Técnicas de evaluación**

A partir del Modelo de Elementos Finitos incluyendo la fisura, con una densificación importante en el extremo de la misma, dado que allí se producen grandes gradientes de tensión por los efectos de flexión y concentración de tensiones. Posteriormente se determina la máxima tensión aplicada en el extremo de la misma. En la Figura 3 se presentan las Tensiones Equivalentes de Von Mises.



**Figura 3. Tensiones de Von Mises - Kg/cm<sup>2</sup>**

**Paso 4: b.- Criterios de aceptación.**

En base a los lineamientos indicados en API 579 <sup>(1)</sup>, utilizados en componentes contenedores de presión que presentan fisuras del tipo longitudinales no pasante, se determina el estado de integridad del cuerpo de la válvula frente a esta situación de falla, combinando criterios fractomecánicos y elastoplásticos.

En la Figura 4 se presentan los resultados obtenidos de aplicar los criterios de análisis mencionados, de API 579 <sup>(1)</sup>, considerando los siguientes parámetros:

$$K_r = K_I / K_{mat} = 0.57$$

$$L_r = \sigma_{Ref} / \sigma_{Flow} = 0.51$$

Siendo

$K_I$  Factor de Intensidad de Tensiones, igual a 4526.92 MPa(mm)<sup>1/2</sup>.

$K_{mat}$  Factor de Intensidad del material, obtenido del Apéndice F, e igual a 7895.6 MPa (mm)<sup>1/2</sup>.

$\sigma_{Ref}$  Tensión de referencia, obtenido mediante la aplicación del Método de Elementos Finitos, tomando un valor promedio igual a 190 MPa (1900 Kg/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_{Flow}$  Tensión Flow, obtenido del Apéndice, e igual a 372.6 MPa.

La curva  $K_r$  en función de  $L_r$ , para un  $L_r$ -max de 1.2 (Aceros al Carbono), es tomada de Figura 9.20 Punto 2c.

Se observa que para los datos referidos, el punto de seguridad o trabajo, identificada como "A", se ubica dentro de la curva FAD, por lo que asegura que la fisura analizada y bajo las condiciones operativas planteadas, no se propagará y es considerada aceptable.

Personal técnico de la planta deberá evaluar la necesidad de continuar operando hasta una próxima parada, planificar una pronta parada o parar y reparar.

**Paso 5: Evaluación de la vida remanente**

Se debe establecer el tamaño de fisura tal, que produzca la falla del componente. Esto permite establecer al inspector su plan de inspección y control del defecto. De esta manera se propone las siguientes características dimensionales de la fisura para su

evaluación, Tabla 3,

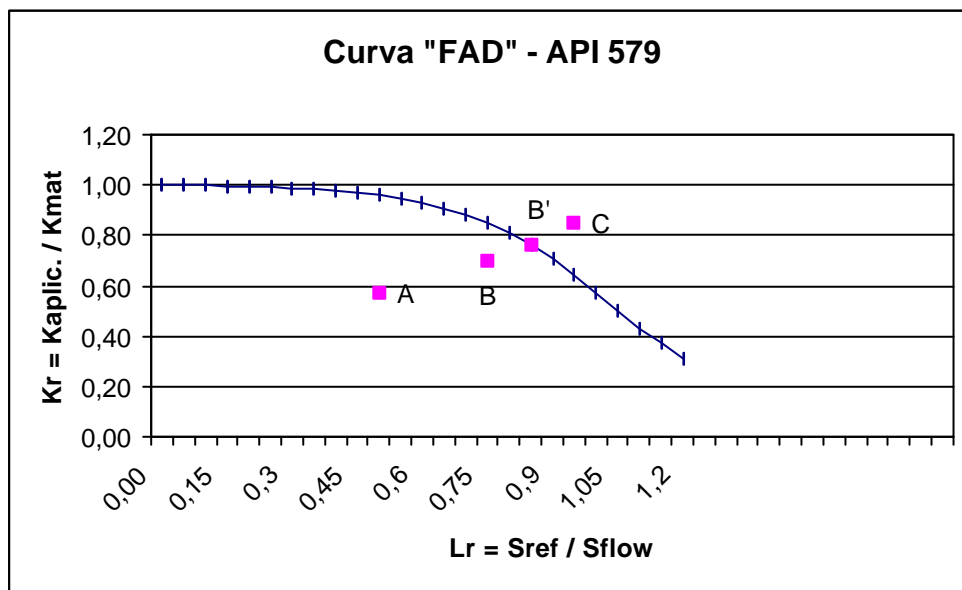
**Tabla 3. Propuesta de Dimensiones de Fisuras Progresivas Futuras**

Tipo de Defecto	Longitud de Fisura mm	Profundidad mm
Tipo "B"	25	3
Tipo "C"	40	4

Para estas fisuras se evalúa la integridad del componente, aplicando el mismo criterio de evaluación y aceptación. En el Gráfico de la Figura 4, se marcan los dos puntos de trabajo B y C.

Se aprecia que para el caso de fisura tipo C, el punto de trabajo esta fuera de la zona de seguridad, mientras que el caso de fisura tipo B, esta levemente más abajo de la línea de trabajo. Esta última situación es aceptada.

Considerando el riesgo operativo del componente se decide aplicar un análisis de integridad más riguroso, para la fisura tipo B, a través de la utilización del Nivel 3 de API 579 <sup>(1)</sup>, en donde se incluye un estudio de Riesgo de acuerdo a los lineamientos de API 581<sup>(5)</sup>. Para esta situación, el punto queda sobre la curva de seguridad, por lo cual alcanzada dicha longitud y profundidad se deberá efectuar la parada de la planta y proceder a la reparación inmediata de la misma.



**Figura 4. Curva "FAD" de API 579 <sup>(1)</sup>**

**Pasos 6, 7 y 8**

Se procede al monitoreo en Servicio de la falla con el objetivo de verificar el desarrollo o propagación de la misma. Además prepara y confecciona la documentación correspondiente.

## 4. Conclusiones

Previo al tratamiento del estudio de integridad se presentan lineamientos generales para ser considerados en la etapa de diseño y del servicio, con el fin de que su entendimiento permita encarar un acertado procedimiento de análisis, que asegure la integridad del componente, a lo largo de su vida útil.

En esta situación un procedimiento de análisis como el presentado, bajo los lineamientos de API 579 <sup>(1)</sup>, encarando un Nivel 2 y/o 3, que incluye un análisis de riesgo, es aceptable según las recomendaciones de los diferentes códigos de aplicación.

Se presentó un procedimiento para evaluar el comportamiento del cuerpo de una válvula con una fisura longitudinal no pasante, detectada durante la operación de la planta a través de Técnicas No Destructivas por Ultrasonido.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el “Estudio de Casos”, es improbable alcanzar la falla del componente en la situación actual, pero para una fisura levemente mayor que la detectada, se alcanza la inestabilidad estructural.

La recomendación práctica al problema propuesto, consistió en planificar anticipadamente, en forma rápida y adecuada la reparación de la falla. Personal técnico y responsable de la planta deberán monitorear el avance de dicha fisura hasta alcanzar su tamaño crítico, antes de llevar a cabo la tarea de reparación.

Hoy el manejo de las “Últimas Tecnologías de Análisis de Integridad Estructural” ofrecen soluciones efectivas al tratamiento de los distintos problemas estructurales que se originan en los componentes instalados en una planta de proceso, requiriendo fundamentalmente del conocimiento de varias disciplinas de la Ingeniería Estructural, tales como la utilización de Códigos de Cálculos actualizados, la aplicación del “Stress Analysis” mediante técnicas computacionales de Elementos Finitos, la Mecánica de la Fractura, Ingeniería de Materiales y la Soldadura.

Todo esto en conjunto y adecuadamente aplicado permite asegurar el correcto funcionamiento de los equipos, posibilitando la extensión de la vida útil en servicio.

## Referencias

1. API 579 "Fitness-For Service" Ed.2001
2. ASME Sección VIII División 1. Ed. 2004, Add.2006
3. ASME Sección VIII División 2 Ed. 2004
4. ASME/ANSI B31<sup>[4]</sup> Piping Design
5. API 581 “Inspección Basada en Riesgo” Ed.2001
6. ANSI/ASME B16.34: Valves - flanged, threaded, and welding end (1996).
7. CAESAR Program, Versión 4.5
8. Finite Element Program COSMOS - Versión 2001