

# Metodología para la Evaluación de la Integridad Estructural de Cilindros de Gas Natural Comprimido “GNC”

Héctor Sanzi<sup>(1)</sup>, Eduardo Asta<sup>(2)</sup>, Gustavo Elvira<sup>(1)</sup>, Francisco Cambiasso<sup>(2)</sup>, María Isabel Lopez Pumarega<sup>(3)</sup>, José Ruzzante<sup>(3,4)</sup>  
Grupo de Investigación de Ingeniería Estructural.  
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Haedo. París 532, (1706) Haedo, Buenos Aires, Argentina.<sup>(1)</sup>  
Grupo de Investigación de Mecánica de la Fractura.  
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Haedo. París 532, (1706) Haedo, Buenos Aires, Argentina.<sup>(2)</sup>  
Comisión Nacional de Energía Atómica, Av. General Paz 1499, (1650) San Martín, Buenos Aires, Argentina.<sup>(3)</sup>  
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Delta, Buenos Aires, Argentina.<sup>(4)</sup>

**Resumen** - El diseño de un recipiente destinado al almacenamiento de Gas Natural Comprimido, para vehículos de transporte, debe considerar las distintas situaciones operativas que se presentan a lo largo del servicio, con el objeto de garantizar las condiciones de seguridad que el mismo requiere. El diseño debería incluir, además de las pautas que son propias en esta etapa, para su homologación, como recipiente nuevo, las técnicas de análisis necesarias que contemplen la evaluación de defectos con determinación de la vida residual, en las revisiones periódicas durante el servicio. En este trabajo se presenta un procedimiento de evaluación aplicable a la etapa de diseño y a la revisión periódica, en donde se detallan los alcances y requerimientos de cada etapa, utilizando técnicas avanzadas de análisis, alternativas a través de la aplicación del Método de Elementos Finitos, la Mecánica de Fractura, y la Emisión Acústica, entre otras. Basándose en los resultados de estos trabajos se realiza una propuesta para la inclusión de éstas técnicas de evaluación en las correspondientes normas de aplicación.

**Abstract** - The design of a vessel for natural compress gas in transporting vehicles, must consider the different operative conditions during its useful life. This must be considered to assess security conditions. For the standardization of a new vessel, the design process must include, beside the guidelines own of this stage, the necessary analysis techniques to evaluate the defects for considering the residual life during the periodic inspections. An evaluation procedure, for design and periodic inspection stages, with detailed scopes and requirements in each operative time of the equipment, are presented. Advanced analysis techniques, as Finite Elements Method and Fracture Mechanics, among others, are used. Based in this work, a proposal for the inclusion of these evaluation techniques in the corresponding standards is made.

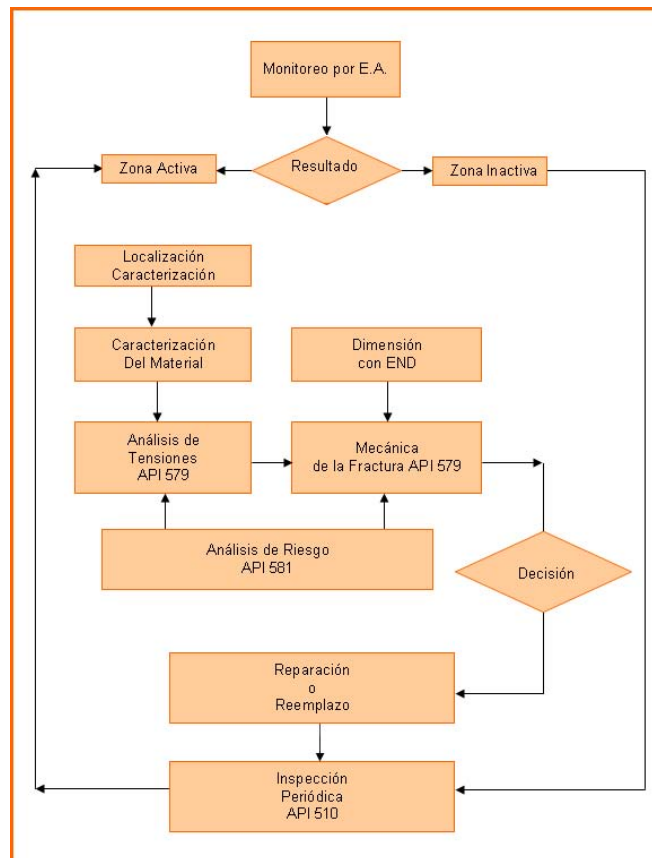
## INTRODUCCIÓN

El programa general para la evaluación de la integridad de un recipiente de Gas Natural Comprimido, en adelante GNC, alcanza los distintos tópicos: Diseño y Homologación de Recipientes Nuevos, Aptitud para el Servicio, Evaluación de Defectos y Vida Residual, Ensayos y Mediciones.

En este trabajo se describen brevemente los alcances y procedimientos que forman parte de un Programa de Evaluación de la Integridad Estructural para equipos de GNC, que comprende el diseño del equipo y el tratamiento de aquellos que se encuentran en Servicio.

En el cuadro (A) se muestra el Procedimiento de Evaluación de Integridad Estructural, para un defecto o falla encontrada en un componente contenedor de presión, el cual será explicado mas adelante.

La propuesta de aplicación de este programa de integridad a las normativas, con su pertinente validación numérica y experimental, que se desarrollará por los grupos de investigación de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Haedo y de la Comisión Nacional de Energía Atómica (cuyos participantes se detallan en el encabezado), ha sido presentada como Proyecto en Áreas Estratégicas del FONCyT, bajo el título de “Normalización de Procedimientos para Homologación y Verificación Periódica de Cilindros de G.N.C. Aplicados a Transporte Público y Privado, Garantizando Mayores Niveles de Seguridad, Mediante el Desarrollo y Experimentación de Metodologías Innovadoras”, obteniéndose su aprobación y financiamiento por el citado organismo, bajo el registro PAE 22.571.



Cuadro (A)

El procedimiento a desarrollar podría ser considerado como la base para la normalización de la homologación e inspección periódica de este tipo de cilindros por el Instituto Argentino de Normalización y Certificación IRAM y posteriormente encuadrado en el marco regulatorio por el Ente Nacional Regulador del Gas, ENARGAS.

Los integrantes que conforman el Proyecto, participaron en la comisión convocada por el ENARGAS (mencionado más adelante), para analizar la factibilidad de metodologías alternativas de control como las que se proponen.

Las instituciones nacionales y privadas, beneficiarias de la conformación y desarrollo del presente proyecto, podrán enriquecer su investigación en dicho tema, complementar estudios ya realizados y desarrollar tecnologías transferibles.

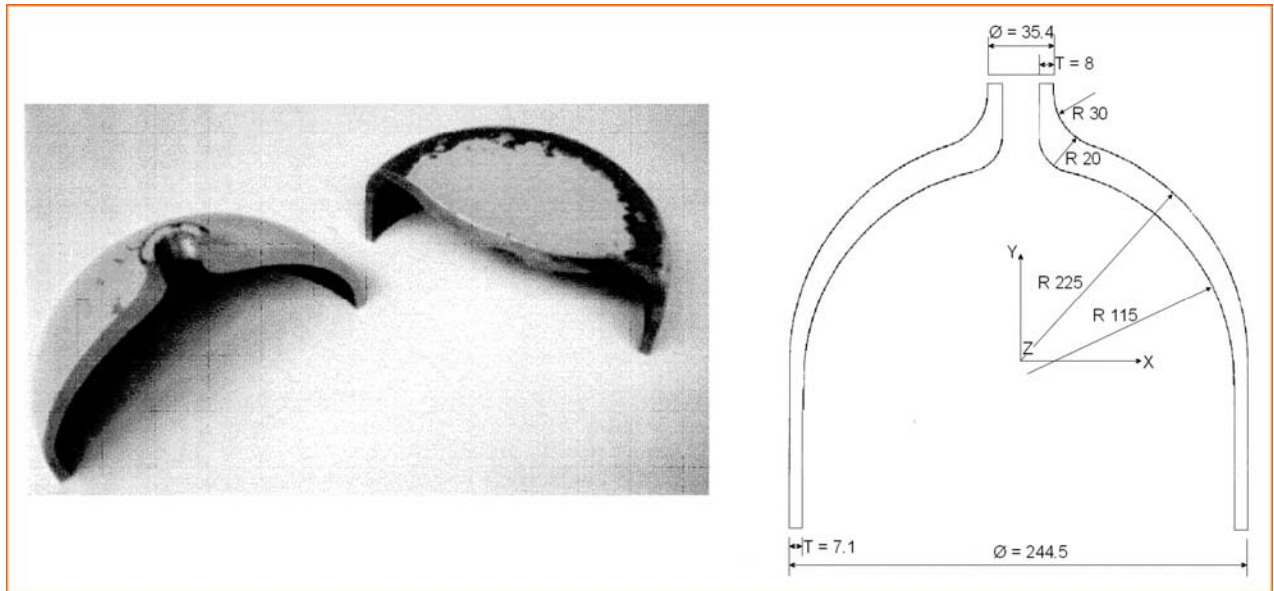
### DISEÑO Y HOMOLOGACIÓN DE NUEVOS CILINDROS

Actualmente, para la fabricación de cilindros se utilizan dos métodos: a partir de tubos y de discos. La industria nacional utiliza el primero de ellos. El acero que se utiliza normalmente es 34CrMo4 (EN 10083), templado y revenido. El control de la geometría o terminación final de los cilindros fabricados a partir de tubo es muy difícil, por la naturaleza del proceso, siendo la zona de transición con cabezal, para aquellos equipos como los mostrados en la Figura 1, la más crítica desde el punto de vista de las tensiones. Se ha verificado que bajo sensibles cambios en la terminación, el estado final de tensiones se modifica notablemente.

Los requisitos actuales reglamentados por la norma IRAM 2526, para el diseño de recipientes de GNC, exigen de una determinada cantidad de ensayos y requerimientos para su homologación. Ellos son, esencialmente: determinación del espesor requerido, ensayos y requerimientos de los materiales, pautas de fabricación, inspecciones y pruebas de aceptación: fatiga o ciclado, hidráulica y estallido.

En cuanto al diseño, la norma establece a través de sus expresiones, el mínimo espesor requerido de la parte cilíndrica y pautas-tolerancias admisibles para la fabricación de sus cabezales (ojivas), considerando criterios de resistencia o integridad tomados a partir de la Teoría Membranal.

A nuestro criterio, en lo que respecta al diseño de estos equipos, la norma es insuficiente e incompleta, a través de sus expresiones, para asegurar la integridad estructural de todas sus partes componentes contenedoras de presión. Por otro lado carece de información detallada sobre el acabado o conformado final de su superficie interior, especialmente en aquellos equipos como el presentado en la figura 1.



*Fig. 1 - Geometría de Detalle de un tipo de Cilindro de GNC*

Es conocido que dependiendo de las formas de los cabezales y de su transición con la parte cilíndrica, se generarán efectos de flexión, que elevan el estado de tensiones del componente. Por otro lado la terminación superficial incrementa el nivel tensional, por efectos de concentración de tensiones.

El incremento del estado tensional en estos equipos condiciona y reduce la vida útil de los mismos, por efectos de fatiga (un estado tensional mayor provoca una disminución en la vida útil del componente).

Para este caso, la norma IRAM 2526 no indica exactamente las expresiones necesarias para establecer el espesor requerido de esta zona particular, sólo pautas y relaciones de espesores referidas al sector cilíndrico son mencionadas, que no garantizan su seguridad estructural. En estos casos, sólo las pruebas o ensayos finales condicionarán su aceptación.

Los principales ensayos exigidos para proceder a la aceptación u homologación de un cilindro de GNC, son las pruebas de ciclado (fatiga) y de estallido, por presión hidráulica.

Otras normativas internacionales de aplicación, utilizadas en nuestro país, tales como el Código ASME Sección VIII División 1 y 2 o Ad-Merckblatter, ANSI/AGA NGV2, entre otras, recomiendan para estos casos el uso de procedimientos alternativos para la evaluación del componente, siendo el Método de Elementos Finitos, el más utilizado.

Es fundamental lograr la evaluación adecuada del componente, con el fin de asegurar su integridad a lo largo de la vida útil.

Esta alternativa de aplicación, a través de la utilización de la Simulación Computacional, mediante el planteo de un modelo por Elementos Finitos, proporciona una herramienta ingenieril adecuada y capaz de asegurar la integridad del componente.

Mediante la aplicación de estas técnicas de evaluación se evitarían costos adicionales o riesgos estructurales y humanos, innecesarios en la etapa de diseño. Es de suma prioridad, que este procedimiento alternativo de cálculo se incorpore en las normas vigentes de aplicación al diseño.

A título de ejemplo, en la Figura 2, se presenta un modelo de Elementos Finitos, que fue utilizado para determinar el comportamiento estructural de un cilindro para la condición operativa, en Servicio.

En base a esta explicación, durante la etapa de diseño, se deberían considerar como mínimo, los siguientes requerimientos con el fin de asegurar el adecuado comportamiento estructural durante todo el servicio.

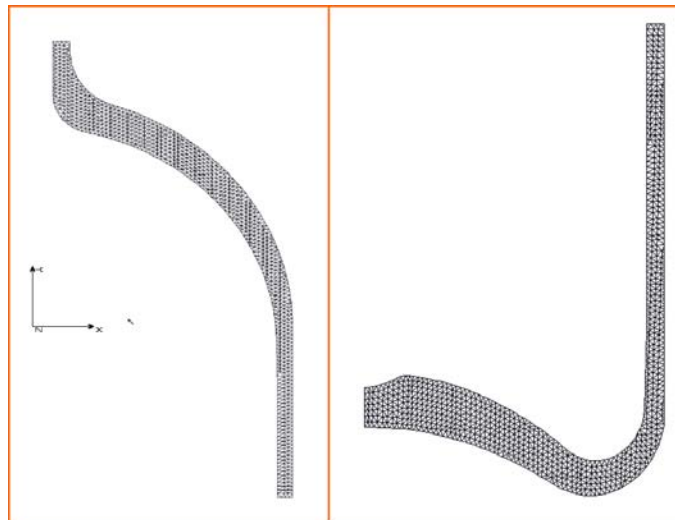


Fig. 2 - Modelo de Elementos Finitos

### **DETERMINACIÓN DEL ESPESOR REQUERIDO PARA LAS DISTINTAS PARTES COMPONENTES DEL RECIPIENTE, UTILIZANDO LAS EXPRESIONES DEL CÓDIGO Y/O MÉTODOS ALTERNATIVOS**

Para configuraciones geométricas o dimensionales de los equipos, o de sus partes componentes, del tipo estándar, resulta de suficiente aplicación la utilización de la Norma IRAM 2526, para determinar el espesor requerido.

Para aquellos cilindros que presentan cabezales, o transiciones, como el mostrado en la Figura 1, u otros similares, la integridad estructural de dicho cabezal puede ser conocido con un alto grado de exactitud, a través de la utilización de Técnicas Computacionales por Elementos Finitos.

### **EVALUACIÓN DE LA FATIGA**

El código ASME Sección VIII División 2, proporciona curvas de diseño de fatiga para determinar el número de ciclos admisibles de un recipiente. Utilizándolas adecuadamente y a partir de un detallado análisis de tensiones (“Stress Analysis”), se podría determinar el número de ciclos admisibles del cilindro para el estado de carga operativo.

De esta manera es posible contar con mayor información sobre el estado del equipo frente a la fatiga, en la etapa de diseño y previo a la homologación, evitando así riesgos futuros del equipo durante el servicio, asegurando de esta manera, mantener los niveles de seguridad adecuados para este tipo de recipiente.

El siguiente procedimiento puede ser aplicado para determinar el grado de integridad del componente, utilizando Técnicas Computacionales mediante Elementos Finitos (“Finite Element Analysis FEA”).

### **REPLANTEO DIMENSIONAL**

La geometría se confecciona en programas de CAD, a partir de datos geométricos del componente completo o de aquellas partes componentes que presenten dificultad. Posteriormente se traslada dicha geometría a un Programa de Elementos Finitos, Figura 2.

Se debe considerar, en aquellas zonas donde actúan grandes gradientes de tensiones, una adecuada densificación de la red de elementos finitos, con el propósito de obtener resultados satisfactorios.

### **PLANTEO DEL MODELO DE CÁLCULO**

Planteo de hipótesis de cálculo tales como linealidad física (el material trabaja en el rango elástico lineal) y linealidad geométrica (no se esperan grandes deformaciones ni desplazamientos).

### **ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS**

Determinación del estado tensional del equipo, obteniendo las tensiones de Von Mises o Tresca, para su comparación con las tensiones admisibles, Figura 3.



*Fig. 3 - Resultados del Estado Tensional del Cilindro*

En este caso, con la intención de optimizar el diseño, es posible aplicar los criterios de Clasificación de Tensiones, dados por el Código ASME Sección VIII División 2, pero utilizando las tensiones admisibles de la División 1.

Es de destacar que la aplicación de la Simulación Computacional, a través del Método de Elementos Finitos, y utilizada a partir de un “Especialista en Stress”, según los requerimientos de los Códigos de aplicación, ASME VIII División 2 durante el diseño y API 579 para el Servicio, permite anticipar en buen grado, el comportamiento estructural del equipo.

### **DETERMINACIÓN DE LA VIDA ÚTIL POR FATIGA**

Como se mencionó anteriormente, el ciclado de cilindros es uno de los principales ensayos que se realizan para aceptar u homologar a un cilindro para GNC.

Las curvas de diseño para fatiga, que proporciona el código ASME Sección VIII División 2, entre otros, permiten determinar para un material dado, el número de ciclos admisibles en función del nivel de tensiones alternativas actuantes.

Estas curvas tienen implícitamente incorporado un coeficiente de seguridad que surge de experiencias propias del código. En la Figura 4, se presentan las curvas de fatiga utilizadas para estos equipos, dependiendo del tipo de material.

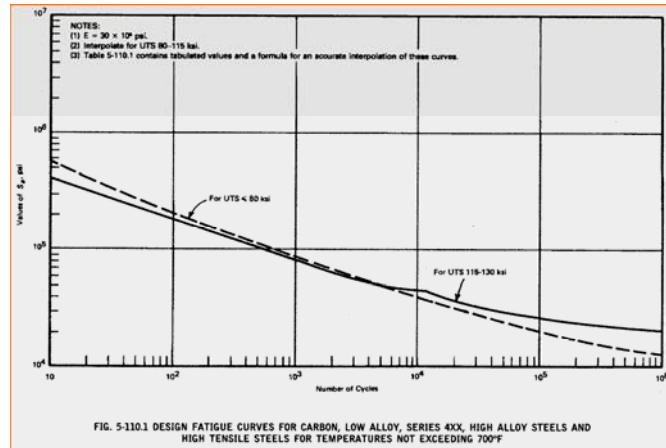


Fig. 4 - Curva de Fatiga tomada del Código ASME Sección VIII Div. 2 - Fig.5-100.1

A partir de los resultados obtenidos del estudio y con la incorporación de datos experimentales sobre el ciclado de los cilindros (trabajo realizado por el fabricante de los cilindros), es posible confeccionar curvas de presión máxima en función del número de ciclos, a partir del cual se produciría la falla.

En esta evaluación se deberían incluir los ciclos "Armónicos" que se producen en la etapa de carga del cilindro, ya que su aplicación reduce la vida útil del mismo.

Obviamente para este caso, los resultados obtenidos a través del uso de las curvas del código diferirán de las del ensayo, ya que estas últimas no están afectadas por coeficientes de seguridad y sólo predicen el número de ciclos en el cual el recipiente alcanza la falla.

Estos resultados proporcionan una importante información para "predecir" el comportamiento del cilindro en la etapa de la prueba y pueden utilizarse como patrones de control o referencia en estudios posteriores para ser realimentados en la etapa de diseño, logrando la optimización del mismo y alcanzando los niveles de seguridad que son propios o necesarios para este tipo de componente y servicio.

### EVALUACIÓN DE EQUIPOS EN SERVICIO

La utilización de cilindros de GNC en vehículos particulares, de transporte de pasajeros y de carga, requiere de la regulación por parte de entes calificados que permitan garantizar, por medio de inspecciones y/o habilitaciones periódicas, la seguridad de dichos dispositivos a lo largo de su vida útil.

La práctica habitual consiste en la inspección de los dispositivos y cilindros ante posibles pérdidas y de una prueba hidráulica como máxima prueba de estanqueidad y resistencia. Los recipientes sometidos a presión, después de un período de uso fijado por las normas internacionales de aplicación, deben someterse a una serie de pruebas y ensayos para permitir su continuidad en servicio.

En nuestro país, en el tema de cilindro para gases, podemos mencionar a la siguiente normativa IRAM vigente:

IRAM 2529-1. Cilindros de acero. Parte 1: Revisión periódica.

IRAM 2529-2. Cilindros de acero para gases. Parte 2: Inspección de llenado para gases permanentes.

IRAM 2529-3. Cilindros de acero para gases. Parte 3: Inspección de llenado para gases no permanentes (licuados).

De la serie de ensayos que son requeridos por las normas vigentes, nos ocuparemos de la Prueba de Presión, que consiste en presurizar al recipiente a la presión de prueba (1.5 veces la presión de trabajo), midiendo la expansión total y la permanente del equipo durante el evento.

La relación porcentual entre la expansión permanente y la total, da una idea de la pérdida de elasticidad del recipiente; dicho de otra manera, sería el porcentaje de la deformación plástica respecto de la deformación total. En la mayoría de las normas cuando este valor supera el 10,0 % es causa de condena, lo que impide la nueva puesta en servicio del recipiente.

Para equipos que se encuentran en servicio, los códigos internacionales de aplicación, sólo se refieren a la prueba de presión cuando son homologados, es decir finalizado el proceso de fabricación, o después de una reparación importante (API 510). Es bien sabido que las reiteradas pruebas de presión, reducen la vida útil del

componente.

En estos recipientes sometidos a presiones cíclicas, es posible que a causa de su carga y posterior descarga, se produzcan fisuras internas, con mayor facilidad en aquellas zonas en donde están presentes los efectos de concentración de tensiones y de flexión (por cambios en la curvatura, caso de los cabezales como el presentado en la Figura 1).

Dichas fisuras son muy difíciles de localizar y en la mayoría de los casos no progresan durante la prueba de presión, dado que no han alcanzado su tamaño crítico. Existe la probabilidad que la prueba contribuya a su crecimiento, dado que el recipiente es presurizado a un 50 % más que la presión de servicio.

Además, este tipo de prueba puede llevar al enmascaramiento de defectos internos en el material y que contribuyan a su crecimiento, pero sin alcanzar la falla total.

En estas condiciones, de pasar la prueba de presión, el equipo se encontraría calificado como “APTO”.

Durante el Servicio y en manos de los usuarios, a una presión menor estas fisuras podrían propagarse por fatiga hasta alcanzar un tamaño crítico, capaz de provocar pérdidas o lo que es peor aún la rotura del mismo.

Ante la necesidad de contar con un procedimiento que permita determinar fisuras en forma rápida, sobre el 100 % del recipiente, se decidió el empleo de un método para la determinación de fisuras activas durante la prueba de presión, utilizando la técnica de Emisión Acústica y herramientas avanzadas de cálculo.

Se presenta aquí un procedimiento para la evaluación de la integridad estructural del recipiente, que contempla:

El análisis de tensiones (“Stress Analysis”) del cilindro en general.

Análisis de integridad utilizando técnicas de Mecánica de Fractura.

Pruebas de Presión.

Implementación de técnicas de ensayo no destructivas, de Emisión Acústica entre otras.

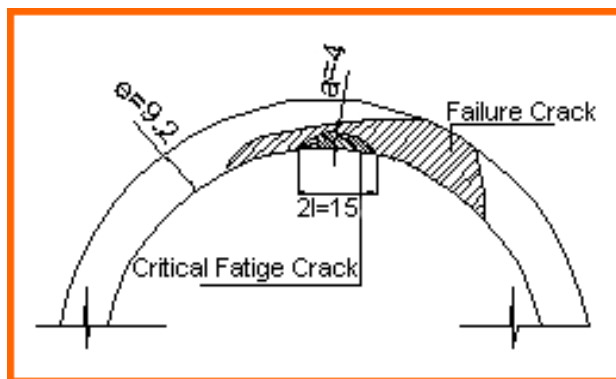
### *Análisis de Tensiones*

Para obtener el estado real de tensiones (“Stress Analysis”) del cilindro se utilizan expresiones conocidas de uso habitual dadas por los códigos, o en su defecto la utilización de la Simulación Computacional mediante el Método de Elementos Finitos, que como se describió anteriormente, proporcionan una herramienta ingenieril alternativa y excelente para encarar este tipo de diseños.

### *Técnicas de Mecánica de la Fractura*

Se ha desarrollado un programa para la evaluación periódica de la integridad estructural de los tanques de GNC utilizando un análisis basado en Mecánica de la Fractura elastoplástica, aplicando el criterio de carga límite. El tamaño inicial de fisura es medido por métodos no destructivos a partir de las indicaciones detectadas mediante emisión acústica.

El tipo de defecto analizado responde al que frecuentemente es detectado en estos equipos, fisura circunferencial superficial interna no pasante, tal como se muestran en la Figura 5, correspondiente al caso real de un cilindro para GNC sometido a un ensayo cíclico hidráulico hasta alcanzar la rotura. Posteriormente, se evaluó la superficie de fractura y se midió el tamaño de la fisura crítica, caracterizada por una zona de crecimiento de la fisura por fatiga y por la fractura final al alcanzar el tamaño crítico.



*Fig. 5 - Geometría del defecto en la condición de falla para el caso real*

De acuerdo con las características geométricas del recipiente, particularmente su espesor, no es factible usar un método de significación de defectos críticos mediante un análisis elasto-plástico, basado en la curva de diseño CTOD o por la metodología de la mecánica de la fractura lineal-elástica, tal como lo recomiendan los procedimientos de los documentos BSI PD 6493, CEGB R6, API 579 y la literatura "Análisis Comparativo de Varios Métodos de Significación de Defectos Aplicados a Uniones Soldadas de Caños de Acero".

Por su parte, la caracterización del material, de acuerdo con los ensayos realizados, no revela un estado de fragilización que pueda situar al mismo bajo el modo de falla conocido como fractura frágil. Esta afirmación se fortalece por tratarse de un recipiente de pared delgada sometido esencialmente a un estado plano de tensión y con una relación entre la tensión aplicada y de fluencia ( $\sigma/\sigma_{0.2}$ ) menor a 0,4.

En consecuencia, el modo probable de falla en condiciones de operación, frente a la presencia de fisuras, podría ser la inestabilidad dúctil o el colapso plástico de la sección neta.

Tomando en consideración la hipótesis de falla descripta, el concepto de "Carga Límite o Colapso Plástico" de la sección neta es apropiado para su utilización. La condición de inestabilidad plástica por carga límite es descripta por medio de la siguiente relación:

$$Lr < 1 \tag{1}$$

$$Lr = \sigma / \sigma_1 \tag{2}$$

siendo  $\sigma$  la tensión aplicada y  $\sigma_1$  la tensión de colapso plástico o carga límite de la estructura fisurada.

Las expresiones de colapso plástico corresponden a una geometría cilíndrica con fisuras circunferenciales internas no pasantes, como la propuesta por Chell (1979) y Kastner(1988), para una presión aplicada  $p_1$ ,

$$p_1 = \sigma_y ( (r_2)^2 - (r_1 + m)^2 ) / (r_1 + m)^2 \tag{3}$$

donde  $\sigma_y$  es la tensión flow (tensión rotura + tensión de fluencia) / 2, t el espesor y  $r_1$  y  $r_2$  el radio interno y externo respectivamente

$$m = a \left( 1 - \left( 1 + \frac{2l^2}{t^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \right) / \left( 1 - a \left( 1 + \frac{2l^2}{t^2} \right)^{-\frac{1}{2}} t \right) \tag{4}$$

donde a es la profundidad o penetración de la fisura y l el largo de la fisura.

Aplicando de manera comparativa las relaciones de Chell, Kastner y el documento CEGB R6, de acuerdo con la metodología de análisis descripta, en la Figura 6 se muestran los resultados obtenidos para distintas combinaciones de profundidad (a) y semilargo (l/2) de fisuras críticas correspondientes a la condición de carga del ensayo hidráulico cíclico (presión  $p_1$ ). Estas curvas representan el lugar geométrico de la condición de falla que predice el análisis de integridad estructural, y en donde se observa el punto de coordenadas que define el tamaño de defecto crítico medido en la superficie de fractura para el caso de ensayo.

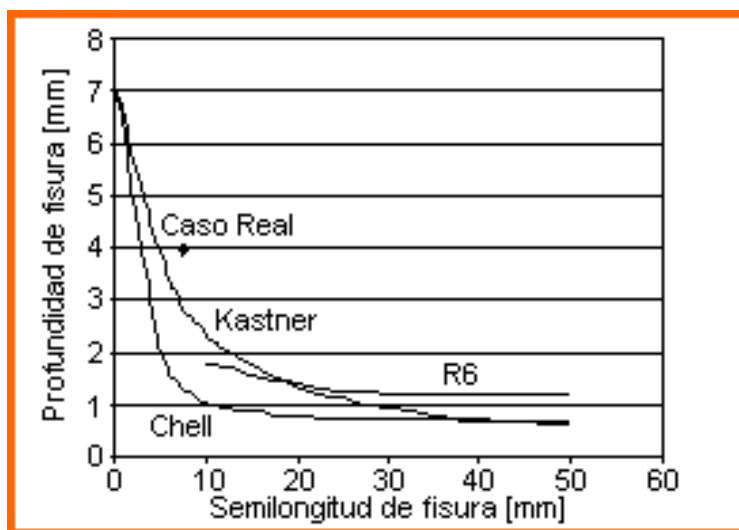
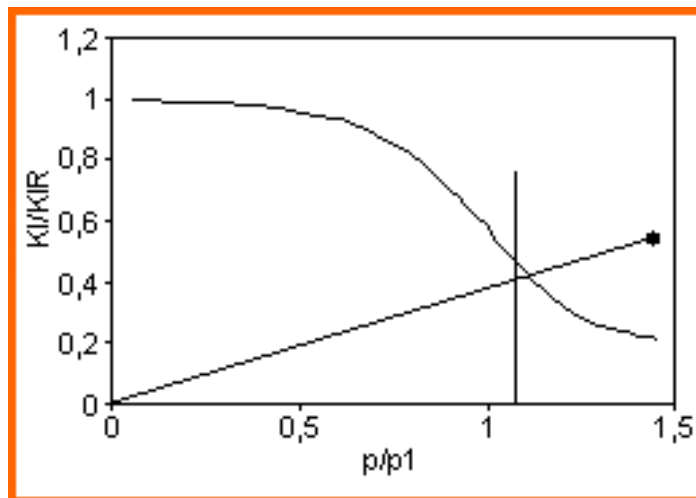


Fig. 6 - Curvas críticas para la integridad estructural de un tubo



Por su parte la Figura 7 muestra la aplicación de la metodología de integridad estructural en términos de un Diagrama de Análisis de Falla “FAD” donde se puede apreciar el punto correspondiente al caso real de rotura o falla obtenido mediante el ensayo de ciclado hidráulico.

También se aprecia el nivel de validez del análisis de integridad estructural considerando el aceptable margen de seguridad entre la condición crítica predicha (curva FAD) y el caso real de falla (recta entre 0 y el punto de falla). En consecuencia esta metodología es una herramienta eficaz para controlar la vida remanente de los cilindros cuando se detecta una fisura en los mismos. En una futura reglamentación de la inspección periódica, las dimensiones de fisura encontradas sobre un cilindro determinado podrían ser contrastadas con las curvas umbrales o de tamaños admisibles de fisuras, como la representada por la Figura 6, o con el diagrama FAD de la Figura 7.



*Fig. 7 - Validación teniendo en cuenta el caso real para el método CEGB R6, El punto incluido corresponde al caso real de rotura obtenida por ciclado hidráulico*

El ensayo de ciclado hidráulico hasta la rotura también permite validar la metodología de integración del crecimiento de fisuras por fatiga en relación con los datos obtenidos en el material del cilindro por medio de ensayos con probetas siguiendo la norma ASTM E 647, que permite obtener los parámetros de comportamiento del material respecto del crecimiento de fisuras por fatiga. Esta es otra de las partes importantes de un programa de evaluación de la integridad estructural para poder predecir el número de ciclos remanentes, a partir de una geometría y tamaño de defecto detectado, hasta alcanzar su condición crítica y consecuentemente el margen de reserva o seguridad respecto del número de ciclos previstos hasta la próxima revisión.

### **Técnica de Emisión Acústica**

Cuando por alguna causa externa, una fisura o grieta, crece en una estructura, genera ondas elásticas. Este fenómeno es llamado Emisión Acústica (EA). Las ondas se propagan por el material en todas las direcciones y al llegar a la superficie del mismo, sensores piezoeléctricos colocados sobre ella, se encargan de detectarlas y transformar la señal elástica, en otra eléctrica, equivalente. La señal eléctrica adecuadamente procesada da información sobre la propagación de la fisura, su severidad y la ubicación de la misma.

La EA como técnica de END es ya ampliamente usada. Incluso en nuestro país existe la normativa que regula su aplicación en distintos ámbitos industriales. De hecho en nuestro medio, ya hace unos años que se está trabajando en EA y cilindros de GNC. El primer ensayo de ciclado hasta rotura en un tubo de GNC, monitoreado con EA, fue realizado en 1993 en el Centro de Reprueba de Cilindros CERECIL S. R. L., con un equipo de EA Dunegan, de dos canales. Allí se logró detectar una primera fisura en la ojiva superior del cilindro, a tan sólo el 20% del ciclado total de rotura, y una segunda fisura en la parte inferior, 40% antes de la pinchadura final.

Posteriormente, por solicitud del Ente Nacional Regulador del Gas, ENARGAS, se realizaron una serie de reuniones entre proveedores de cilindros de GNC, centros de reprueba e institutos de investigación, para analizar la factibilidad del uso de la EA durante el control periódico de los cilindros.

En la literatura, existen antecedentes de la aplicación conjunta de la técnica de la EA y la mecánica de la fractura para estudiar la integridad de recipientes, con ensayos realizados en la empresa PETROBRAS.

En el ámbito internacional existe normativa específica de EA aplicada a tubos de GNC, algunos ejemplos son las siguientes normas o procedimientos: la ASTM E 1491; la CGA C18 la ISO/CD 16148. También como referencia, se puede tener en cuenta el Artículo 13 del Código ASME.

En Sudamérica, Brasil por intermedio de la Asociación Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), desarrolló una norma para cilindros de gas, la norma NBR 13199, mientras que el Instituto Argentino de Normalización y Certificación IRAM, tuvo la norma IRAM 771.

Por iniciativa de la Comisión de EA del IRAM, en el año 2004 se comenzó a trabajar en la normalización MERCOSUR de END, a través del Comité Sectorial 24 (CSM 24). Por lo tanto, las dos últimas normas mencionadas, la argentina y la brasileña, serán remplazadas por la equivalente norma MERCOSUR NM 304:2005. También se puede tener en cuenta la NM 303:2005, si bien no es específica para los cilindros de GNC.

En general, se toma al ensayo de EA como una alternativa a la prueba hidráulica, donde la máxima presión a alcanzar es un 50 % más alta que la presión de diseño.

Con el método de EA, la presión máxima a la cual el cilindro debe ser ensayado, es sólo un 10% superior a la presión de servicio. La presurización del cilindro debe realizarse a baja velocidad de llenado y de manera escalonada, de esta forma se garantiza la confiabilidad del ensayo. Generalmente se trabaja con equipos de EA de dos canales (lo que implica un bajo costo). Así, en el caso de que hubiera posibles áreas “activas” en el cilindro, se lograría su localización. Un área se considera “activa”, si se localizan cinco o más eventos de EA, concentrados en un zona caracterizada por una longitud equivalente al 5% de la distancia entre los dos sensores (generalmente se ubican en los extremos del cilindro). Si existiera una región activa en el tubo, ésta deberá ser inspeccionada con otros métodos de END, de manera de poder dimensionar los defectos. Si la dimensión del defecto es menor que el tamaño máximo de la fisura admisible, calculado sobre la base de la mecánica de fractura, el cilindro podrá seguir en uso hasta la próxima revisión.

El empleo de la EA durante una prueba hidráulica tiene la ventaja fundamental de requerir llegar sólo al 110 % de la presión de trabajo permitiendo localizar las fisuras activas, que son las únicas que representan un potencial peligro para la integridad del cilindro.

### CONCLUSIONES

El alcance de las normas nacionales, dedicadas tanto al diseño de estos tipos de componentes como de aquellos que se encuentran en Servicio, no resultan suficientes para garantizar su integridad a lo largo de su vida útil.

Sólo las pruebas de presión, permiten de alguna manera predecir o prevenir riesgos estructurales, pero como se comentó, no siempre este tipo de ensayos aseguran el 100 % de eficiencia desde el punto de vista de su integridad.

Es de suma importancia incorporar el procedimiento de análisis aquí propuesto, en la etapa de Diseño y Servicio, utilizando técnicas avanzadas de cálculo, que permiten conocer detalladamente el estado tensional y de deformaciones del equipo, de tal manera de minimizar los riesgos a valores aceptables.

El procedimiento de análisis como el descrito, ha llevado a presentar a las autoridades reguladoras una propuesta de su incorporación a la norma IRAM 2526, con los siguientes objetivos:

Resguardar la seguridad del usuario de equipos de GNC y de la población en general.

Conocer el exacto estado tensional del cilindro, asegurando para el importador y fabricante nacional de cilindros, la integridad estructural de dicho recipiente y la certeza de su aceptación en la etapa de ensayos.

Contar con mayor información sobre los efectos de fatiga en los cilindros, a través de:

Efectuar un detallado análisis de la integridad estructural del recipiente mediante el método de elementos finitos.

Obtención de los parámetros de mecánica de la fractura de los materiales y análisis de significación de defectos.

Detección de fisuras a través de técnicas de Emisión Acústica.

Con respecto a este último punto, la Emisión Acústica, se desprende de lo ya comentado, que el país cuenta con suficiente experiencia en el área y con el respaldo de una importante normativa ya vigente.

## AGRADECIMIENTOS

Parte de este Proyecto es subsidiado por el Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica FONCyT, Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, ANPCyT, Argentina.

## REFERENCIAS

- IRAM 2526  
ASME Boiler and Pressure Vessel Code. ASME Sección VIII, División 1 (2004 Add. 2006).  
ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sección VIII División 2, Edición 2002  
Normas Alemanas para el diseño de Recipientes Contenedores de Presión, AD-Merkblätter  
ANSI, Requisitos básicos para GNC, ANSI/AGA NGV2 (1992).  
API 579 Edición 2002  
IRAM 2529-Parte 1, 2 y 3, Cilindros de acero para gases.  
API 510 Edición 2002  
BSI PD 6493, British Standards Inst. (1980).  
Milne I., Assessment of Integrity of Structures Containing Defects, Rep. CEBG R/H/R6 Rev.3, (1986).  
Asta, E.P. y Pérez Ipiña, J.E., Análisis Comparativo de Varios Métodos de Significación de Defectos Aplicados a Uniones Soldadas de Caños de Acero, Proc. VII Congr. Sold. Arg., XIV.1- XIV .11, Vol 2, Bs.As. (1988).  
Chell, G., Elastic - Plastic Fracture Mechanics, Developments in Fracture Mechanics 1, Appl. Science Pub., 67-105 (1979).  
Miller, A. G., Review of Limit Loads Structures Containing Defects, Int.J.Pres.Ves.& Pip.32 197-327, (1988).  
Norma ASTM E 647  
"Normativa de Emisión Acústica en la Argentina", M. I. López Pumarega, J. E. Ruzzante, Actas "V Congreso Regional de Ensayos No Destructivos y Estructurales, V CORENDE", ISBN: 987-1154-66-6, pág. 325-331, Neuquén, Argentina, 2-4 de noviembre de 2005.  
"Informe sobre la posibilidad de aplicación de la Emisión Acústica a la revisión periódica de cilindros de acero sin costura para GNC", Generado por la Comisión Técnica creada al efecto, 15 de abril de 1998. ENARGAS.  
"Predicción de fallas por Emisión Acústica en cilindros de GNC", J. Ruzzante, I. López Pumarega, A. Straus, presentado en las "Jornadas de la Asociación Argentina de Materiales (SAM'94)", Bahía Blanca, Prov. de Buenos Aires, 7 al 10 de junio de 1994  
"Avaliação de Integridade de Esferas de GLP, Utilizando o Ensaio de Emissão Acústica e a Mecânica da Fratura", Pedro Feres Filho, Guilherme Victor Peixoto Donato, "XIX CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS", São Paulo, Agosto, 2000.  
ASTM E 1419, "Standard Test Method for Examination of Seamless, Gas-Filled, Pressure Vessels Using Acoustic Emission", (2002b)".  
GA C18, "Methods for Acoustic Emission Requalification of Seamless steel Compressed Gas Tubes", (1995).  
ISO/CD 16148, "Gas cylinders-refillable seamless gas cylinders-Acoustic Emission testing for periodic inspection", may (2001).  
ASME Code, Article 13, "Continuous Acoustic Emission Monitoring", 2005.  
NBR 13199, "Cilindros sem costura-Método de Ensaio por Emissão Acústica", (1994).  
IRAM 711, "Ensayos de cilindros de acero sin costura por emisión Acústica" (2004).  
NM 304:2005. "Ensayos No Destructivos, Ensayos de cilindros de acero sin costura por emisión acústica".  
NM 303:2005. "Análisis de la emisión acústica en estructuras durante la estimulación controlada"