

## Estudio numérico y experimental del comportamiento de grietas del material compuesto en recipientes de presión

Omar D. Elaskar, Luis T. Aguirre<sup>1</sup>, Alejandro Dominguez<sup>1</sup>

*Centro de Investigaciones Aplicadas, Instituto Universitario Aeronáutico, Av. Fuerza Aérea  
6500 Córdoba, Argentina, oelaskar@hotmail.com, <http://www.iua.edu.ar>*

<sup>1</sup>*Departamento de Materiales y Tecnología, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez  
Sarfield 1601, Córdoba, Argentina, [aeroing@arnet.com.ar](mailto:aeroing@arnet.com.ar), <http://www.unc.edu.ar>*

### RESUMEN

El presente estudio, trata sobre el comportamiento mecánico superficial de un recipiente de acero, recubierto con Plástico Reforzados con Fibra de Vidrio (PRFV).

El interés del estudio radica en determinar el comportamiento del PRFV sobre un cilindro de GNC, a fin de que dicho conocimiento ayude a proponer soluciones que eviten el daño que se puede producir a las fibras de vidrio, cuando éstas quedan expuestas a los agentes ácidos a través de las grietas en la resina.

Con el resultado de este estudio (magnitud de la abertura de la grieta), se podrán determinar a futuro las características que debe cumplir un recubrimiento, para evitar el pasaje de agentes corrosivos a través de las grietas, cuando el cilindro se expande por presurización interna.

El alcance de este trabajo consiste en analizar a través de un modelo numérico las deformaciones que se producen en la superficie de un cilindro de GNC Tipo II de origen ruso utilizados en el mercado local. Además se analiza experimentalmente una muestra de PRFV de uno de estos cilindros, a fin de determinar el espaciamiento promedio que se produce entre grieta y grieta,

De esta manera se estudia numéricamente la expansión del cilindro, y experimentalmente se realiza un análisis superficial de las grietas en el PRFV, buscando como objetivo final el valor de la apertura de la grieta cuando el cilindro se encuentre a la presión de trabajo, a través de interrelacionar ambos análisis.

Los resultados de estas simulaciones sirven para determinar la mayor apertura de las grietas (caso más desfavorable para un recubrimiento protector) que se observan en la superficie de PRFV de los cilindros de GNC rusos.

**Palabras Claves:** Fibra de vidrio, GNC, cilindro, deformación, grietas

## **1. INTRODUCCIÓN**

A un cilindro cuando se le aplica presión interna tiende a expandirse, y si además está reforzado externamente con PRFV bobinado circunferencialmente, es común que aparezcan algunos pequeños agrietamientos en la resina en forma de aros sobre el cilindro, paralelos a las fibras, sin que éstas se corten, ni por ello se afecte a la resistencia mecánica requerida por el cilindro (Figura 5).

Para el caso de los cilindros de GNC tipo 2, (como los estudiado en este trabajo), la deformación longitudinal debido a la presurización del cilindro, agrieta a la resina, y hace que las caras de estas grietas se separen, permitiendo penetrar a los agentes corrosivos al interior del PRFV. Así algunas fibras de vidrio quedan expuestas al ataque ácido, y estando además ellas bajo tensión de tracción elevada, se aumenta la posibilidad de que se corten (Figura 1 y 2). Esta falla se observó en los siniestros ocurridos a los cilindros tipo 3 de origen nacional [2].

Para evitar este potencial problema, se podría adicionar sobre el cilindro, un recubrimiento protector que sea capaz de soportar la deformación localizada por sobre encima de la grieta, que tiende a abrirse, para que de esta forma se pueda aislar la fibra de vidrio de los agentes corrosivos provenientes del medio exterior. Por lo cual se torna esencial conocer de antemano la magnitud de estas grietas.

Debido a la complejidad de medir en forma directa sobre un cilindro real la magnitud de apertura de una grieta, se propone este análisis como base de estudio para determinar dicho valor. En el presente trabajo, se hace referencia a un estudio similar realizado para un cilindro de origen nacional del mismo "tipo 2", que aún no se ha lanzado al mercado [4].

Con la información del PRFV [5] y del acero por un lado, y de las dimensiones del cilindro por otro [8], se pueden obtener las deformaciones por medio del método de elementos finitos.

Además con la observación y análisis de una muestra de PRFV de uno de estos cilindros, se puede determinar al espaciado promedio entre las grietas.

A partir de correlacionar las deformaciones longitudinales sobre la superficie del cilindro, calculadas numéricamente, y de la separación entre las grietas, determinada experimentalmente de una muestra, se puede inferir la apertura de las cara de una grieta, cuando el cilindro se lo presuriza a la carga de funcionamiento normal.

## **2. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA**

### **2.1. Corrosión Bajo Tensión del a Fibra de Vidrio**

En los años 90, se desarrolló en el país un modelo de cilindro de GNC "tipo 3" de liner Aluminio reforzado con PRFV, tecnológicamente superior a los disponibles en el mercado.

Desafortunadamente en esa época, las normas obviaron las implicaciones de la “corrosión ácida bajo tensión”, sobre el PRFV. Luego sucedieron algunos accidentes y explosiones cuyas causas eran desconocidas en ese momento, ni existían antecedentes del problema a nivel mundial.

Surgieron así varias líneas de investigaciones que concluyeron que la causa de la rotura se origina solamente si existe un daño estructural o defecto previo de gran magnitud en los cilindros [2, 5]. Pesquisas posteriores concluyeron que las fibras de vidrio, eran corroídas rápidamente por agentes ácidos, especialmente bajo estados tensionales elevados, tal es la situación en estos recipientes al ser cargados con gas a presión.

El fenómeno que se observó del ataque del ácido, se produce sobre las fibras de vidrio, y no en la matriz de resina que las recubre, que solo se agrieta por efectos de la deformación (Figura 5). De esta manera la presión interna expande al cilindro y también a la matriz de resina que en algunos lugares se agrieta interlaminarmente, sin que por esto se reduzca la resistencia mecánica del cilindro, ya que las fibras no se cortan, pero quedando ellas expuestas directamente al contacto con agentes externos.

## **2.2. Propuesta de solución al problema**

Bajo estas condiciones de ataque ácido, se propone recubrir externamente al cilindro con una capa protectora, que además de resistir al ataque ácido, debe ser capaz de resistir la deformación que le produzca la separación entre caras de grietas superficiales que recubra [6].

Para poder determinar las características mecánicas y geométricas que debe satisfacer un recubrimiento protector contra el paso del agente corrosivo, previamente se debe determinar la magnitud que tomará la grieta en el cilindro a recubrir.

De esta manera este estudio busca determinar el valor de amplitud de las grietas en el PRFV sobre el cilindro ruso mencionado mas arriba.

## **3. ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CILINDRO DE GNC**

### **3.1. Descripción del cilindro ruso**

En los años 90, se distribuyeron en el mercado local cilindros rusos de GNC “tipo 2” de liner de acero reforzado circunferencialmente con PRFV.

La información y datos necesarios se obtuvieron de tres fuentes independientes. Una fue la observación y análisis de un par de cilindros en funcionamiento montados sobre un vehículo (Figura 3). También se contó con el plano constructivo de dicho cilindro (Figura 4). Y la tercer fuente de información sobre el cilindro es a partir de una muestra de PRFV de uno de dichos cilindros que fueron analizados previamente (Figura 6).

### **3.2. Verificación experimental del agrietamiento**

A los cilindros montados sobre el vehículo se les realizó una observación directa del agrietamiento de su superficie de PRFV. De dicha verificación experimental se pudo determinar la existencia de grietas producidas por una presurización interna, sin que ello implique problema de correcto funcionamiento y aprobación del Estado (Figura 5).

Por otro lado, de la muestra de PRFV obtenida del bobinado de un cilindro de GNC Tipo 2, similar a los estudiados en el presente trabajo (Figura 6), se pudo determinar con aproximación el espaciamiento entre grieta y grieta en el PRFV, además muestra la morfología de las grietas sobre la muestra. Y en la Figura 7, se observa la distancia relevada en milímetros, entre las grietas. Con esta información se pudo determinar la distancia promedio entre grieta y grieta producidas en el PRFV formando aros circunferenciales.

La Tabla 1 resume las observaciones y mediciones realizadas a la muestra de material compuesto extraída de un cilindro tipo 2 [4].

## **4. ESTUDIO TEÓRICO DEL CILINDRO**

### **4.1. Análisis por FEM del cilindro completo**

Para las simulaciones numéricas, se utilizó el software ABAQUS/Standard, v6.5, Student Version. El Hardware utilizado fue una AMD +5600 Dual Core de 2,8Ghz, con 2Gb de memoria.

La geometría del cilindro se basó en las dimensiones obtenidas del plano del mismo.

En un primer "step" de la simulación [1], se aplica como carga la presión de zunchado en el cual se producen deformaciones plásticas permanentes, y que perduran en el cilindro como producto terminado. Luego en un segundo "step", el cilindro es despresurizado a 0 bar para disponer del producto en su estado normal de utilización, para finalmente "inflarlo" a 200 bares, como carga normal de trabajo [7].

De esta manera se busca determinar la deformación en el sentido longitudinal que se produce en el cilindro. Se toma el caso mas desfavorable, cuando toda la deformación axial es la suma de las separaciones entre caras de todas las grietas sobre la superficie del PRFV, y que además los aros de PRFV resultantes entre cada grieta, no absorben deformación axial y puede deslizarse sobre el liner de acero.

El modelo se describe a continuación:

Tipo de modelo:	Axisimétrico
Tipo de elemento:	CAX4R
N° de nodos:	822
N° de elementos:	640
Cond. de Contorno:	Simetría longitudinal
Cond. Contacto:	Tie (unido)
Etapas:	3 Steps (zunchado, 0bar y 200 bar)

Diámetro interno:	304.0 mm
Espesor de acero:	4.1 mm
Espesor domos:	7.1 mm
Diámetro ext.liner:	312.2 mm
Espesor de PRFV:	4.5 mm
Diámetro ext. Tubo:	321.2 mm
Long. Total:	882 mm
Long. Parte cilind.:	696.0 mm

En referencia a los materiales se utilizaron los siguientes valores en "Elastic", para el Acero: E: 207000 Mpa y Módulo de Poisson: 0.3.

Características plásticas, introducidas en el comando "Plastic" con una tensión de fluencia a 834Mpa y máxima de 932Mpa, con alargamiento del 14% máximo

Para el PRFV se asignaron propiedades ortotrópicas, mediante el comando "Engineering Constant", de la siguiente manera en MPa E1, E2 y E3 (8000,8000,40000), Nu12, Nu13 y Nu23 (0.25, 0.05 y 0.05) y finalmente G12, G13 y G23 (1300, 3000 y 3000)

#### **4.2 Resultado de la magnitud de la grieta.**

De las salidas numéricas, se extrajeron los valores de los desplazamientos del Nodo 300, utilizado como referencia, como lo indica la siguiente Tabla 2.

Se encuentra entonces que el "Nodo 300" de referencia se desplaza una distancia a lo largo del cilindro (eje 2 del modelo) de:  $D = 0,22 \text{ mm}$  (291,378 - 291,158)

También dicho nodo se desplaza radialmente (eje 1):  $H = 0,378\text{mm}$  (162,409 - 162,031), valor no utilizado en este estudio.

Por considerarse que los aros de resina entre grieta y grieta, no absorben deformación, (caso conservador de cálculo), resulta que todas las aperturas de las grietas que aparecen sobre dicho tramo han de sumar el valor D, de 0,22 mm en 291,158 mm de longitud de cilindro.

### **5. CONCLUSION**

De la observación experimental del cilindro, se obtuvo una distancia promedio entre grieta y grieta de 21,2 mm, resultando que en una longitud de 291mm, se encuentran casi 14 grietas ( $291/21.2=13.7$ ), con una apertura promedio A de 0,0157mm ( $0,22/14$ ) de distancia entre las caras de la grieta, cuando el cilindro se encuentra presurizado.

Así, cualquier recubrimiento protector para este cilindro ruso, deberá soportar una deformación localizada de 0,0157mm, similar a la abertura de grieta determinada en el presente trabajo.

6. ECUACIONES, FIGURAS Y TABLAS

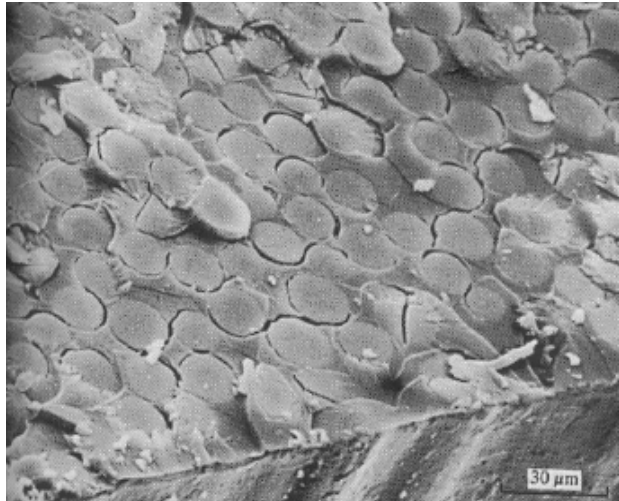


Figura 1: Fibras de vidrio cortadas por Corrosión ácida.

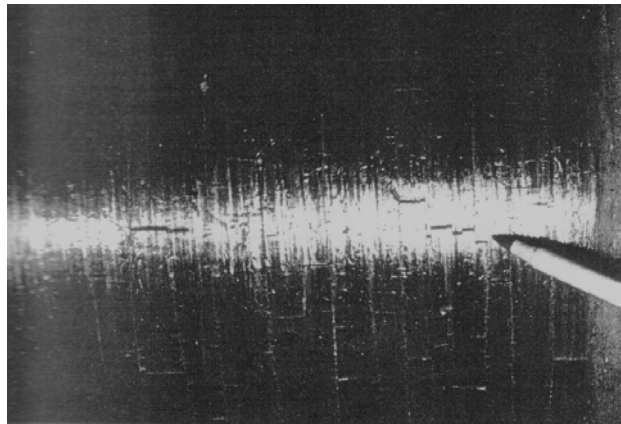


Figura 2: Fibras de vidrio de cilindro ruso, corroidas por ácido



Figura 3: Cilindros de GNC Tipo 2 (acero PRFV) montados en un vehículo.

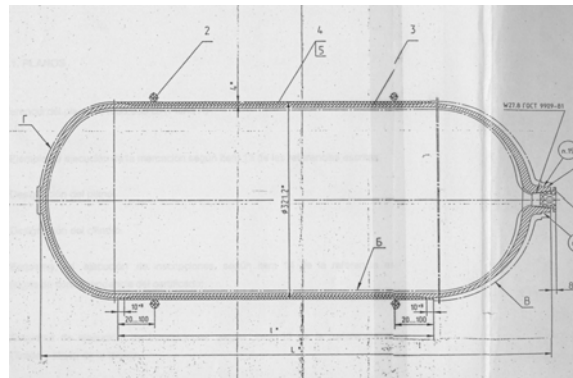


Figura 4: Plano del Cilindros de GNC Tipo 2 ruso.



Figura 5: Grietas observadas en cilindros de GNC Tipo 2, montado en un vehículo

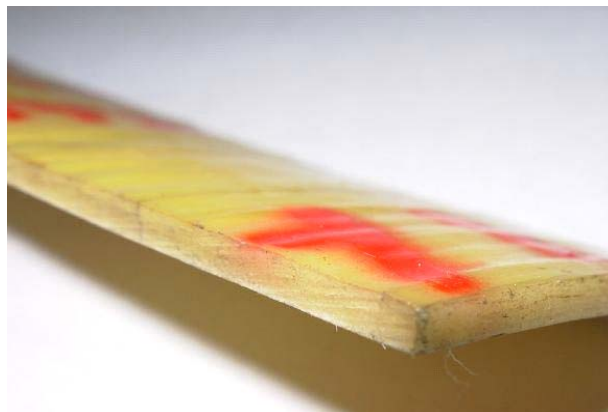


Figura 6: Muestra de PRFV, donde se visualizan las grietas a en el espesor.

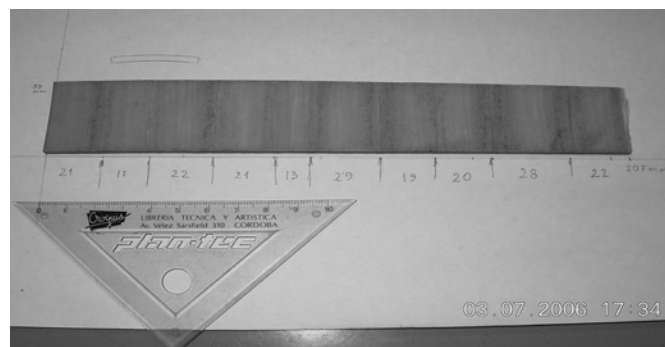


Figura 7: Muestra de PRFV, donde se visualizan las grietas a en el espesor.

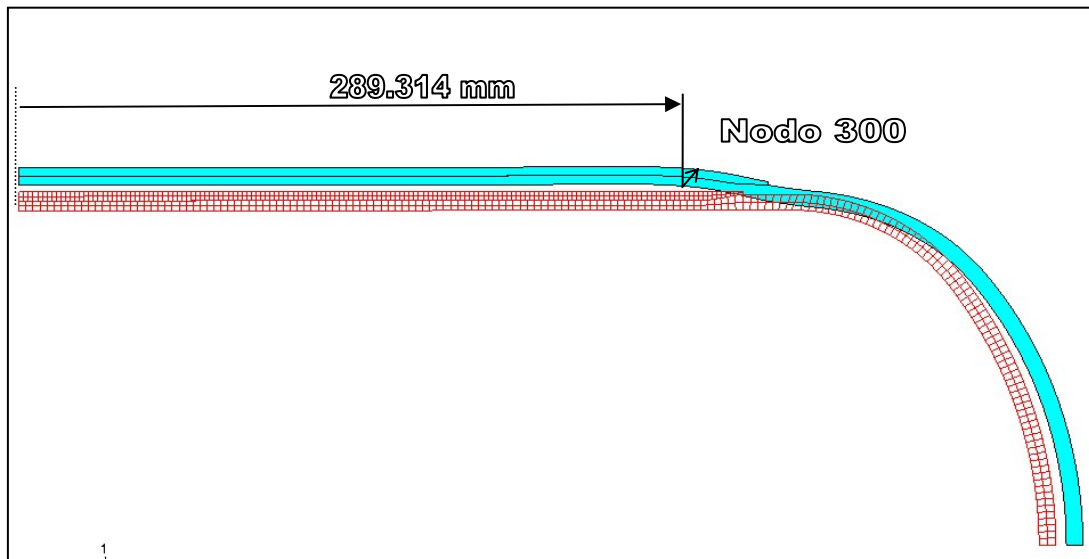


Figura 8: Modelo de Elementos Finitos: Desplazamiento del nodo de referencia (Node 300).

Tabla 1: Distanciamiento en milímetros, entre grietas en el PRFV de un cilindro ruso de GNC Tipo 2.

Grieta N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Espaciado (mm)	21	17	22	21	13	29	19	20	28	22
Longitud	212 mm									
Espaciado Promedio	21,2 mm									

Tabla 2: Desplazamiento del nodo de referencia del modelo FEM

Eje-Dirección	1	2	3
Coordenadas Iniciales (mm)	160,600	289,314	0,00
Zunchado, y sin presión (mm)	162,031	<b>291,158</b>	0,00
Zunchado, y a 200 Bar (mm)	162,409	<b>291,378</b>	0,00

## 6. REFERENCIAS

- [1] ABAQUS/Standard. *User's Manual v5.4*. Hibbit, Karlson & Sorensen, Inc. 1994
- [2] Aguirre Luis, *Análisis de falla de cilindros de GNC Tipo 3*, Kalvanco S.A., 1992.
- [3] Darsie Duillo, *Los Plásticos Reforzados con Fibras de Vidrio*. Ed. Americalee. Buenos Aires.1980.
- [4] Elaskar, Omar, *Informe de proyecto GRF*, Agencia Córdoba Ciencia, 2006.
- [5] Gonzales Reyes, *Materiales Compuestos*, Univ. De Navarra, En Internet [www.tecnun.es/asignaturas/Matcomp/pagina\\_6.html](http://www.tecnun.es/asignaturas/Matcomp/pagina_6.html). 2003.
- [6] Inflex, *Ensayo de resistencia a los ácidos, Informe de Certificación de cilindros GNC tipo 2*, Argentoil.S.A, 2004.
- [7] ISO-11439, Gas cylinders- High pressure cylinders for the on-board storage of natural gas, International Standard Org., First Edition, 2000.
- [8] Tecnomash BA 54-20, Informe de Homologación, Oxigenoterapia SACIFIA, 1994