



II CAIM 2010
Segundo Congreso Argentino
de Ingeniería Mecánica
San Juan - Noviembre 2010

Estudio Numérico del Comportamiento de la Protección Flotante en Cilindros de Presión Reforzados con Fibra de Vidrio

Omar D. Elaskar^{*1,2}, Jorge García²

^{*1}**Centro de Investigaciones Aplicadas, Instituto Universitario Aeronáutico**
Av. Fuerza Aérea 6500 Córdoba, Argentina, uelaskar@hotmail.com, <http://www.iua.edu.ar>

²**Departamento de Aeronáutica, Universidad Nacional de Córdoba**
Av. Vélez Sarfield 1601, Córdoba, Argentina, jgarcia@efn.uncor.edu, <http://www.unc.edu.ar>

RESUMEN

El presente estudio trata sobre el comportamiento mecánico de un “coating” o “recubrimiento flotante” protector (debido a la posibilidad de deslizarse sobre la superficie) aplicados en cilindros de Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV), con objeto de aislar y proteger a éstas fibras de la corrosión ácida bajo tensión. Este tipo de producto tiene aplicaciones en “tanques de cohetes”, “cilindros de GNC”, “recipientes de aeronaves”, etc. [1].

El interés del estudio radica, en el daño que se produce en las fibras de vidrio, cuando por agrietamiento en la resina, éstas quedan expuestas a los agentes ácidos que puedan encontrarse en el ambiente [2]. Para ello, el recubrimiento debe ser capaz de resistir la deformación sobre la grieta y evitar el pasaje de agentes corrosivos.

El estudio del comportamiento mecánico de un cilindro con PRFV y de su recubrimiento protector adherido al cilindro, ya ha sido estudiado previamente, demostrando posibles problemas de rotura del mismo debido a la adherencia del recubrimiento [3].

En el presente estudio se presentan los resultados de simulaciones numéricas aplicados a una nueva solución adoptada para dichos recubrimientos protectores. El mismo se caracteriza por la posibilidad que tiene de deslizarse o flotar por sobre el PRFV que protege, y de esa manera deformarse en un área mayor sin alcanzar altas deformaciones concentradas, que puedan ocasionar roturas después de varios ciclos.

Para ello a partir de los resultados ya obtenidos previamente de un estudio del cilindro, se analiza numéricamente su recubrimiento, con el software ABAQUS [5-6], modelando el recubrimiento protector sobre el PRFV y analizando los efectos que se producen en el recubrimiento, cuando se expande el cilindro, con la consecuente apertura de grietas en la resina.

Los datos de características de los materiales han sido obtenidos previamente de estudios anteriores realizados sobre cilindros de Gas Natural Comprimido de uso automotriz [4].

Palabras Claves: protección, PRFV, cilindro de presión

1. INTRODUCCIÓN

Es normal que un cilindro de material compuesto, como ser PRFV (Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio) al presurizarse se expanda y aparezcan pequeñas grietas en la resina, debido a la rotura de la resina o su desprendimiento sobre la fibra, por los que las grietas son paralelas a éstas últimas, y sin que éstas se corten, fenómeno que no afecta de manera importante en la resistencia mecánica requerida por el cilindro.

Pero la aparición de estas grietas permite la penetración de los agentes corrosivos al interior del PRFV. Así algunas fibras de vidrio quedan expuestas al ataque ácido (Corrosión Ácida Bajo Tensión), y estando además ellas bajo cargas de tracción elevada, se aumenta la posibilidad de falla del PRFV en el cilindro.

En el caso de que el cilindro disponga de un recubrimiento protector, además de resistir al ácido, éste debiera ser capaz de soportar la deformación localizada por encima de la grieta, que tiende a abrirse y de esta forma evitar la penetración de agentes corrosivos.

Se han realizado ya estudios del mecanismo de agrietamiento en un cilindro de PRFV [3] y se analizó luego su recubrimiento protector, mediante modelos numéricos por el Método de Elementos Finitos (FEM) concluyéndose del alto riesgo que implica un recubrimiento pegado o adherido al PRFV [4].

El presente trabajo no analiza las características de resistencia química del material del recubrimiento, y solo se enfoca en el análisis mecánico del mismo, para comparar la diferencia de que existe entre recubrimientos no totalmente pegados al PRFV, con diferentes grados de magnitud de la “zona no adherida” a la superficie que protege. Un recubrimiento totalmente adherido a la superficie, fue ya analizado en trabajos previos y se concluyó en su alto riesgo de rotura [4].

2. EL PORBLEMA DE CORROSIÓN EN LA FIBRA DE VIDRIO:

2.1. Antecedentes :

En los años 90, se desarrollaron cilindros de GNC “tipo 3” de liner Aluminio reforzado con PRFV, tecnológicamente superiores a los disponibles en el mercado. Desafortunadamente en esa época, las normas obviaron las implicaciones de la “corrosión ácida bajo tensión”, sobre el PRFV [7-8]. Luego sucedieron algunos accidentes y explosiones cuyas causas eran desconocidas en aquel momento, ni existían antecedentes concretos del problema a nivel mundial.

Surgieron así varias líneas de investigaciones que concluyeron que la resistencia estructural era la adecuada y solamente la causa se origina si existiera un daño estructural o defecto previo de gran magnitud en los cilindros [10]. 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 [9].

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. 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, pero quedando las fibras de vidrio expuestas directamente al contacto con agentes externos.

2.2. Ejemplos de agrietamientos en el PRFV:

En la Figura 1, se muestra un vehículo con dos tubos de GNC rusos del Tipo 2. Se observó en ellos (Figura 2) el agrietamiento entre los aros de PRFV, sin que ello perjudicara el normal funcionamiento y pudieran superar en varias oportunidades las pruebas hidráulicas exigidas por normas.



Figura 1: Cilindros de GNC Tipo 2 (acero PRFV) montados en un vehículo.



Figura 2: Grietas observadas en cilindros de GNC Tipo 2, en condiciones normales

2.3. Ejemplos de ataque ácido al PRFV:

Durante la etapa de certificación de estos cilindros, se pudo observar (Figura 3), que después de atacarlo con ácido, varios aros de fibra de vidrio son cortados en forma transversal.

Debido a que en los cilindros del Tipo 2, el liner de metal también resiste estructuralmente, es que este tipo de cilindro puede superar el requisito mínimo del 85% de la presión de reventamiento una vez atacada las fibras con ácido. Esta situación no se presenta en los recipientes del Tipo 3 con PRFV, en que la resistencia estructural está a cargo exclusivo del material compuesto [11]. En la Figura 4, puede observarse el corte característico de forma abrupta en las fibras de vidrio, en una muestra de PRFV atacada con ácido.

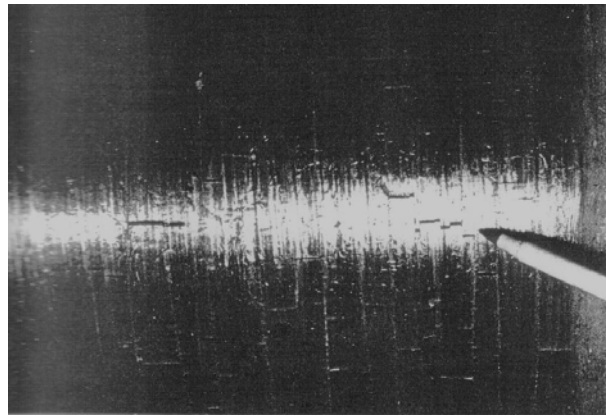


Figura 3: Fibras de vidrio de cilindro ruso, corroídas por ácido

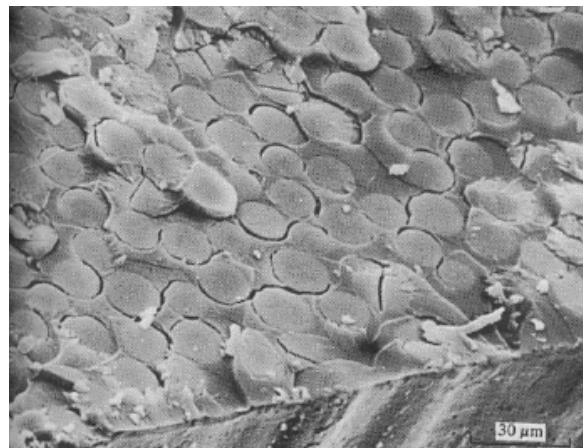


Figura 4: Fibras de vidrio cortadas por Corrosión ácida. (Archivo Univ. Navarra)

Bajo estas condiciones es que se propuso aplicar pinturas protectoras al PRFV para evitar este ataque ácido, recubrimiento que es estudiado y comparado en función del tamaño de la zona de adherencia al PRFV que protege.

3. ANÁLISIS NUMÉRICO DEL RECUBRIMIENTO

Para estudiar la grieta superficial en el PRFV, se realizó un modelo axisimétrico del recubrimiento del cilindro. En estudios previos se analizó numéricamente un cilindro similar a los fabricados localmente, y se determinó la apertura de grietas debido a la expansión producida por la presurización interna del cilindro.

En la Figura 5, se aprecia el cilindro deformado, surgido de los estudios numéricos que determinaron la magnitud de apertura de grietas en cilindros de GNC a 200 Bar de presión interna.

Con la información disponible de los estudios previos, se propuso el modelo numérico para analizar el recubrimiento protector del PRFV, que consiste en simular la apertura de las caras de una hipotética grieta ubicada por debajo de la capa del Recubrimiento Protector (“coating”) de una décima de milímetro (100 μ m) de espesor, tal se puede observar en la Figura 6.

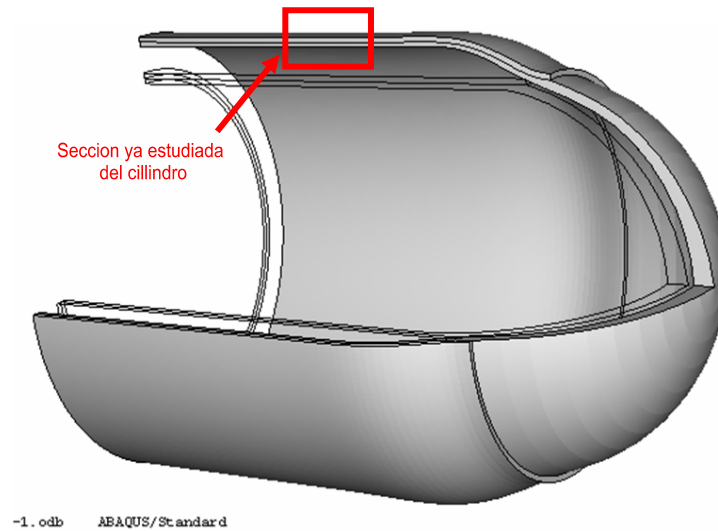


Figura 5: Expansión del cilindro de fabricación nacional, cargado a 200 Bar. (x50), e indicando la sección estudiada.

Una variable de importancia, es la zona del coating “No adherida” al PRFV en las inmediaciones de la grieta. Este valor, se utilizó como variable de ajuste en las distintas corridas, a fin de determinar el límite permisible, antes de alcanzar la deformación máxima resistida por el material del coating. El resto de la superficie del coating se considera perfectamente unida (Tied) al PRFV.

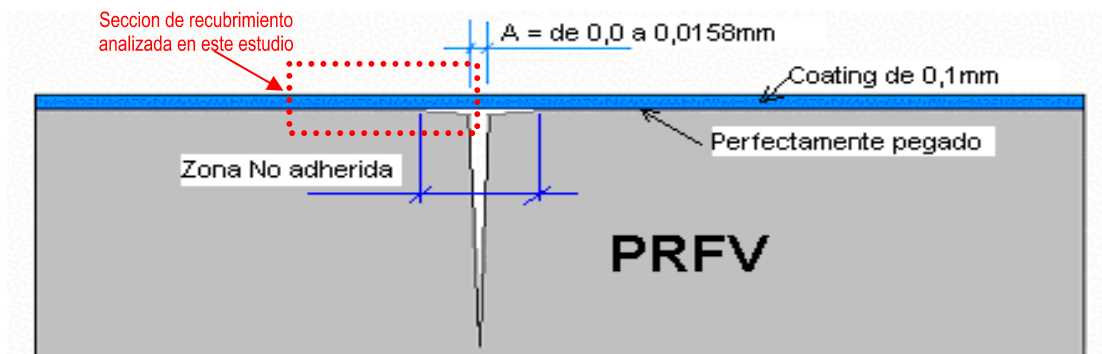


Figura 6: Esquema del modelo de simulación de grieta.

3.1. Modelo FEM del Recubrimiento:

Se realizó un modelo axisimétrico de 406 elementos (Figura 7). Como condición de contorno se supuso simetría en el eje vertical de la grieta.

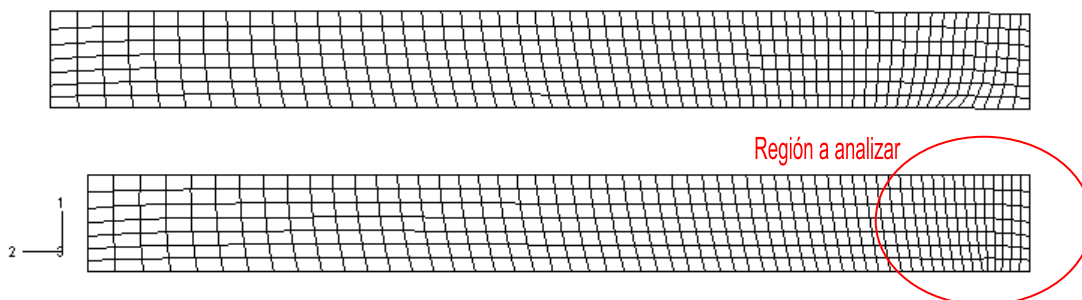


Figura 7: Modelo del recubrimiento y su deformada x5.

Como condiciones de contorno adicionales al Recubrimiento, se aplicó un desplazamiento similar a la apertura de la grieta ya determinada previamente ($A = 0,0158\text{mm}$) en la zona inferior del mismo, que se encuentra adherido al PRFV.

Como variable de ajuste para la construcción geométrica del modelo, se determinó en sucesivas corridas una "zona No adherida", a la que no se le aplica desplazamiento como condición de contorno, de tal forma que la deformación máxima resultante en el cálculo numérico del "coating" no alcance su límite máximo de rotura.

Las principales características del modelo son:

Tipo de modelo:	Axisimétrico
Tipo de elemento:	CAX4I Es un elemento para Tensión deformación "Continuum solid AXisymmetric Element, 4 node, Incompatible Mode (para evitar hourglassing)
N° de nodos:	472
N° de elementos:	406
Espesor del Coating:	0,1 mm
Longitud axial:	1,0 mm
Diámetro interno de coating:	327mm (diámetro exterior del cilindro)
Zona no adherida:	0,1mm (1 espesor) y 0,08mm (80% del espesor)

Las condiciones de contorno aplicadas:

Eje vertical de la grieta:	Condición de Simetría
Zona Adherida:	$U_x = A/2 = -0,0079\text{mm}$ (deformación axial) $U_y = H = 0,34\text{mm}$ (expansión radial)

Al poliuretano se lo considera perfectamente elástico en todo su campo de deformación. Los valores introducidos al modelo son:

Módulo elástico	"E" = 25 Kg/mm ²
Alargamiento máximo	"A" = 0,32 (32%)
Módulo de Poisson	"u" = 0,33

3.2 Cálculo Numérico del Recubrimiento:

Se aclara que la zona no adherida es perfectamente deslizable, y el resto de la zona en contacto está perfectamente adherida, (condición TIED del software).

Se observa entonces en la Figura 6 cuando la zona no adherida alcanza el equivalente de un espesor del recubrimiento (0,1mm), las deformaciones máximas logarítmicas alcanzan un valor de 29%, muy cercano al 32% máximo resistido por el material, y localizado en la zona donde se inicia el desprendimiento del recubrimiento al PRFV.

En cambio, si se considera una zona "No adherida" menor, (solo un 80% del espesor), las deformaciones aumentan y ya en forma elevada (Figura 7), alcanzado valores picos mayores del 0,32 de deformación máxima soportada por el material, lo que indica que dicho valor (80% del espesor), se corre riesgo de falla.

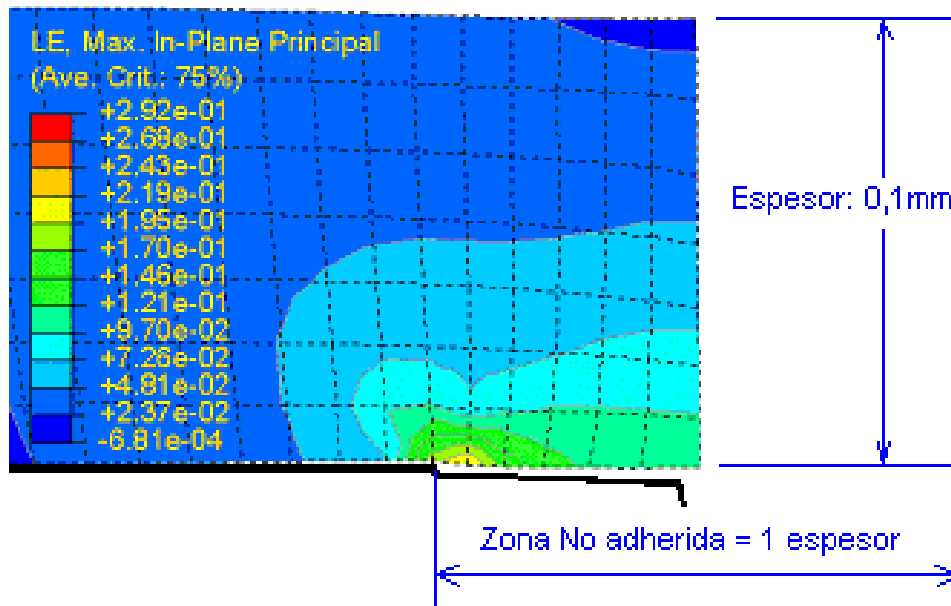


Figura 6: Deformaciones logarítmicas en el recubrimiento (zona No adherida = 1 espesor)

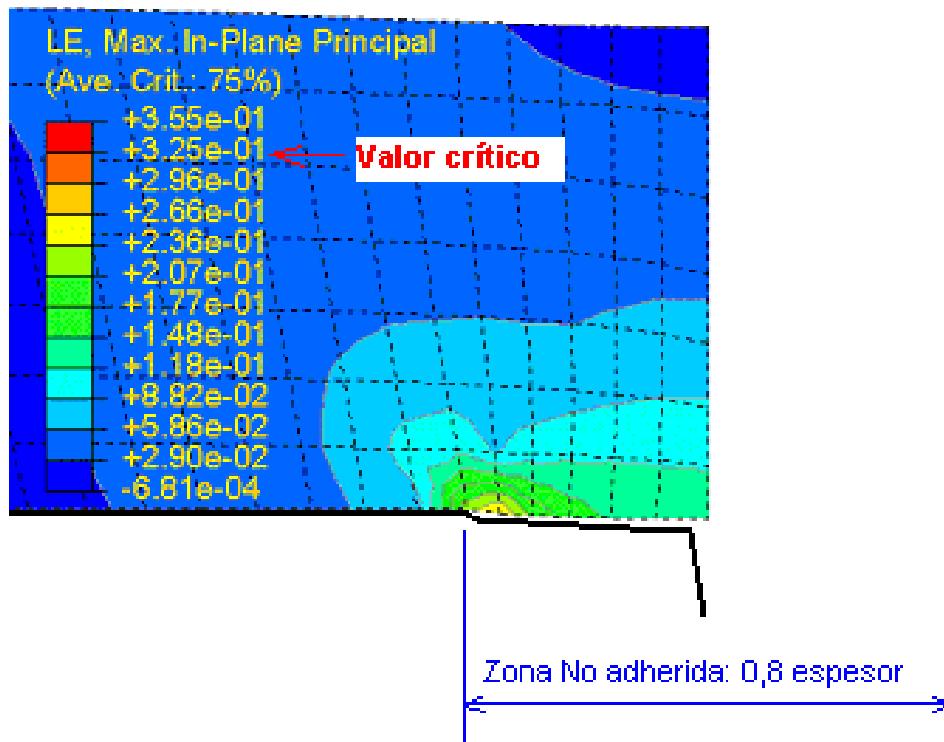


Figura 7: Deformaciones logarítmicas en el recubrimiento (zona No adherida = 0.8 espesor)

3.3 Análisis de Resultados

Considerando un recubrimiento solo adherido a los extremos del cilindro y el resto totalmente desprendido sobre la superficie del PRFV, la deformación en el recubrimiento protector se calcula directamente a partir del tamaño de un aro de material compuesto ($L=21,2\text{mm}$) y su elongación es la apertura de la grieta ($\Delta L=0,0158\text{mm}$). Así la deformación alcanzada es menor al 0,08%, no implicando riesgos de rotura.

En relación a un recubrimiento total y perfectamente adherido, la deformación del recubrimiento tenderá a valores altísimos, debido a que la longitud de referencia es cero.

En cambio para casos mas realistas en que el recubrimiento esta en una situación intermedia (parcialmente adherido) es necesario determinar sus limites de inicio de deformación de rotura. De esta manera en este estudio se determina que en una zona no adherida comprendida entre el 80% al 100% del espesor, se alcanza la deformación que supera el 32% máximo que resiste el material. La Figura 8 representa este comportamiento, indicando que para zonas desprendidas mayores a un espesor de recubrimiento las deformaciones sobre el recubrimiento son seguras.

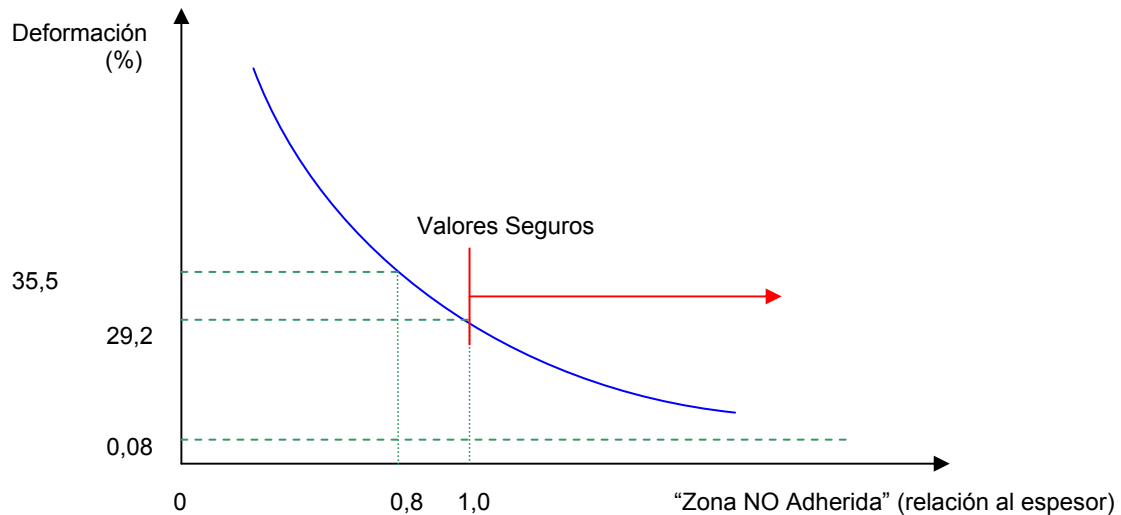


Figura 8: Relación entre la zona desprendida y la deformación del recubrimiento

4. CONCLUSIONES:

De estudios experimentales, y conjuntamente con análisis numéricos del cilindro realizados en estudios previos, se pudo determinar la separación que se produce entre las caras de una grieta en el PRFV. Este valor es el máximo que se podría observar para el tipo de cilindro analizado, ya que considerar que toda la deformación del cilindro se reparte exclusivamente en las separaciones de las caras de las grietas, sin que la resina se deforme nada, nos indica que se está en una condición conservativa para el cálculo.

Esta consideración previa, da como resultado que un recubrimiento con baja adherencia (Zona No adherida grande) al PRFV es beneficioso, ya que la deformación de la expansión del cilindro, se distribuye en una zona más amplia del recubrimiento.

Se concluye que para el modelo realizado y las condiciones impuestas, el material del recubrimiento, debiera poseer un modulo elástico de 25Kg/mm² (como algunos poliuretanos de bajo módulo), y un alargamiento máximo de no menos del 32%; así una capa de recubrimiento de una décima de milímetro sería capaz de resistir las deformaciones sobre la grietas.

Se plantea la necesidad de realizar relevamientos experimentales, a fin de determinar con precisión, los valores de las Zonas No adheridas.

5. REFERENCIAS:

- [1] D. Darsie. "Los Plásticos Reforzados con Fibras de Vidrio". Ed. Americalee.1980. Buenos Aires.
- [2] "International Journal of Pressure Vessels and Piping", Ainsworth, R., N°64, ISSN 0308-0161, 1995.
- [3] O. Elaskar, L. Aguirre, ENIEF 2007, "Análisis FEM en recipientes de presión de materiales compuestos", Córdoba, 2007.

- [4] O. Elaskar, L. Aguirre, I CAIM2008, “Estudio numérico y experimental del comportamiento de grietas del material compuesto en recipientes de presión”. Bahía Blanca. 2008.
- [5] ABAQUS/Standard User’s Manual v5.4. Hibbit, Karlson & Sorensen, Inc. 1994.
- [6] ABAQUS/Examples Manual v5.4. Hibbit, Karlson & Sorensen, Inc. 1994
- [7] Sharples, J., Bouchard, P, “Assessment of crack opening area for leak rates” .., in Specialist meeting on leak before break in vessels. Lyon, France. 1995.
- [8] International Standard, ISO-11439 “Gas cylinders- High pressure cylinders for the on-board storage of natural gas...”, First Edition, 2000.
- [9] Colom F., Pere P. “Caracterización microestructural mecánica de HDPE/fibras”.1998.
- [10] Argentoil.S.A, “Informe de ensayo de resistencia a los ácidos según ISO-11439”, 2004.
- [11] CSA International. “Basic requirements for compressed natural gas vehicles fuel containers”. NGV Coalition, Ohio, 2000.