

ANÁLISIS POR MEDIO DE ELEMENTOS FINITOS DEL RECUBRIMIENTO PROTECTOR EN RECIPIENTES DE PRESIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS

Omar D. Elaskar^{a,b}, Luis T. Aguirre^{a,b}, Alejandro Domínguez^b

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

^bDepartamento de Materiales y Tecnología, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Velez Sarfield
1601, Córdoba, Argentina, aeroing@arnet.com.ar, <http://www.unc.edu.ar>

Palabras Claves: Protección, Recipientes de presión, Fibra de Vidrio, Recubrimiento.

Resumen. El presente trabajo es una aplicación práctica del Método de Elementos Finitos, en el que se estudia el comportamiento mecánico del Recubrimiento Protector aplicado a cilindros con Plástico Reforzados con Fibra de Vidrio (PRFV) para proteger a la fibra de vidrio de la corrosión ácida. Estos tipos de recipientes, tienen aplicaciones en “tanques de cohetes”, “cilindros de GNC”, “recipientes aeronáuticos”, etc. El estudio se inicia con un relevamiento experimental sobre un cilindro de GNC con PRFV, para determinar su geometría, y observar la cantidad y espaciado entre las grietas en el material compuesto. Posteriormente se realiza una simulación numérica de dicho cilindro para determinar la deformación sobre el mismo al ser presurizado. Como primer resultado del análisis, se puede determinar cuantitativamente la separación entre las caras de las grietas, al presurizarse el cilindro, considerando de forma conservativa, que dicha deformación calculada numéricamente, se reparte entre todas las aperturas de las grietas que fueron observadas en el estudio experimental previo de una muestra. Por último y a partir de los resultados precedentes, se realiza un modelo numérico de la capa del recubrimiento protector solamente, a fin de corroborar sus características mecánicas y geométricas, a fin de resistir localizadamente la separación que se produce entre las caras internas de una grieta cuando el cilindro se expande al presurizarse. Se ha utilizado el software ABAQUS/Standard v6.5, en ambos modelos de elementos finitos. El modelo del cilindro es axilsimétrico con plano de simetría longitudinal y formulación de elementos de “integración reducida”. Se considera ortótropo al material compuesto y plasticidad en el acero. El modelo del recubrimiento se considera material elástico, con deformaciones no lineales, y formulación de elemento de “modo incompatible”.

1 INTRODUCCIÓN

Cuando se carga presión en un cilindro reforzado con material compuesto bobinado circunferencialmente, como ser PRFV (Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio), es común que aparezcan algunos pequeños agrietamientos en la resina y paralelos a las fibras, sin que éstas se corten, ni por ello se afecte a la resistencia mecánica requerida por el cilindro.

La expansión longitudinal del cilindro, hace que las caras de estas grietas se separen, permitiendo penetrar a los agentes corrosivos al interior del PRFV (Elaskar, 2006). Así algunas fibras de vidrio quedan expuestas al ataque ácido, y estando además ellas bajo tensión de tracción elevada, se aumenta la posibilidad de falla del PRFV en el cilindro bajo el fenómeno de corrosión ácida.

En el caso de que el cilindro disponga de un recubrimiento protector, 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 estudió entonces el mecanismo de agrietamiento en un cilindro de PRFV y se analizó luego su recubrimiento protector, mediante modelos numéricos por el Método de Elementos Finitos (FEM). A partir de las propiedades mecánicas adoptadas para un material del recubrimiento (Darsie, 1980) y las dimensionales de su geometría, se pueden determinar los requisitos mínimos de algunas variables de ajuste, para que el recubrimiento protector resista la apertura localizada de la grieta.

El presente trabajo no analiza las características de resistencia química del material del recubrimiento.

2 CORROSIÓN ÁCIDA BAJO TENSIÓN

2.1 Antecedentes del problema

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. Luego sucedieron algunos accidentes y explosiones cuyas causas se desconocidas en ese momento, ni existían antecedentes 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 existe un daño estructural o defecto previo de gran magnitud en los cilindros (Aguirre, 1992). 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. 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 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 se cortan en forma transversal.

Gracias 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 reventón una vez atacada las fibras con ácido (NGV, 2000). 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. 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 (Gonzales, 2003).

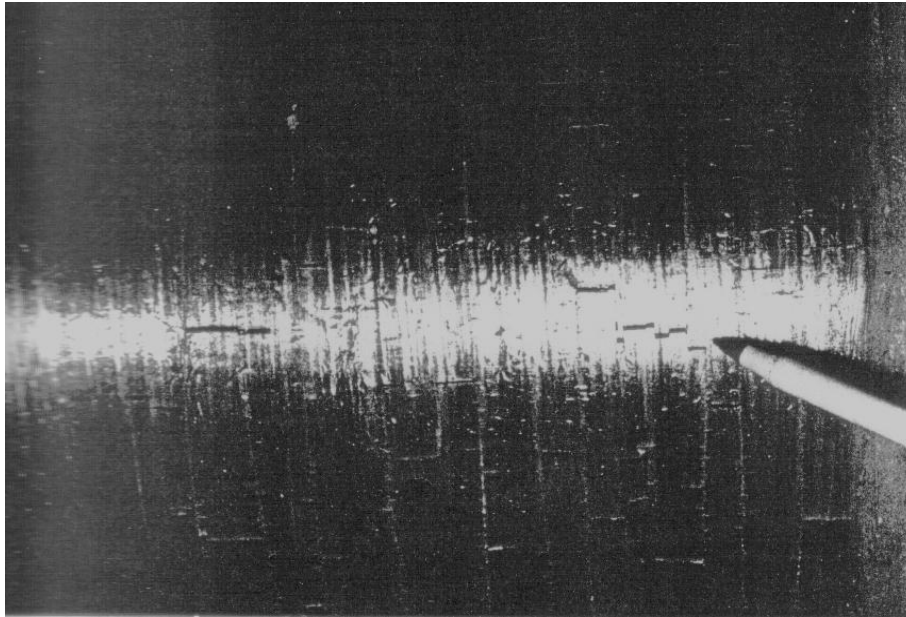


Figura 3: Fibras de vidrio de cilindro ruso, corroídas por ácido

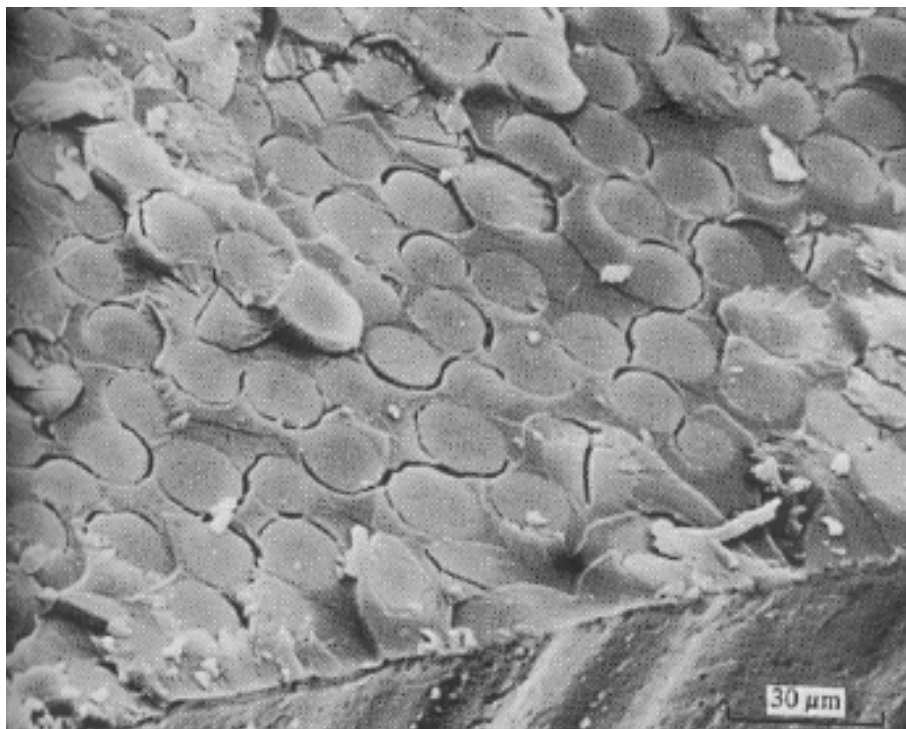


Figura 4: Fibras de vidrio cortadas por Corrosión ácida.

3 CARACTERIZACIÓN DEL CILINDRO

3.1 Descripción del Cilindro

Desde el punto de vista estructural, el cilindro se compone de un liner interior de acero y un refuerzo exterior de de PRFV (Figura 5). El bobinado en este tipo cilindro (tipo 2), es exclusivamente en la zona cilíndrica del mismo, y puede considerarse que la dirección de la fibra es a 0° , o sea que su función es actuar como un refuerzo a las tensiones circunferenciales, y no longitudinales.

Esta disposición es la que genera que las deformaciones longitudinales del cilindro no sean resistidas por las fibras, y de esta forma la matriz de resina no soporta esta deformación que genera grietas transversales al cilindro.

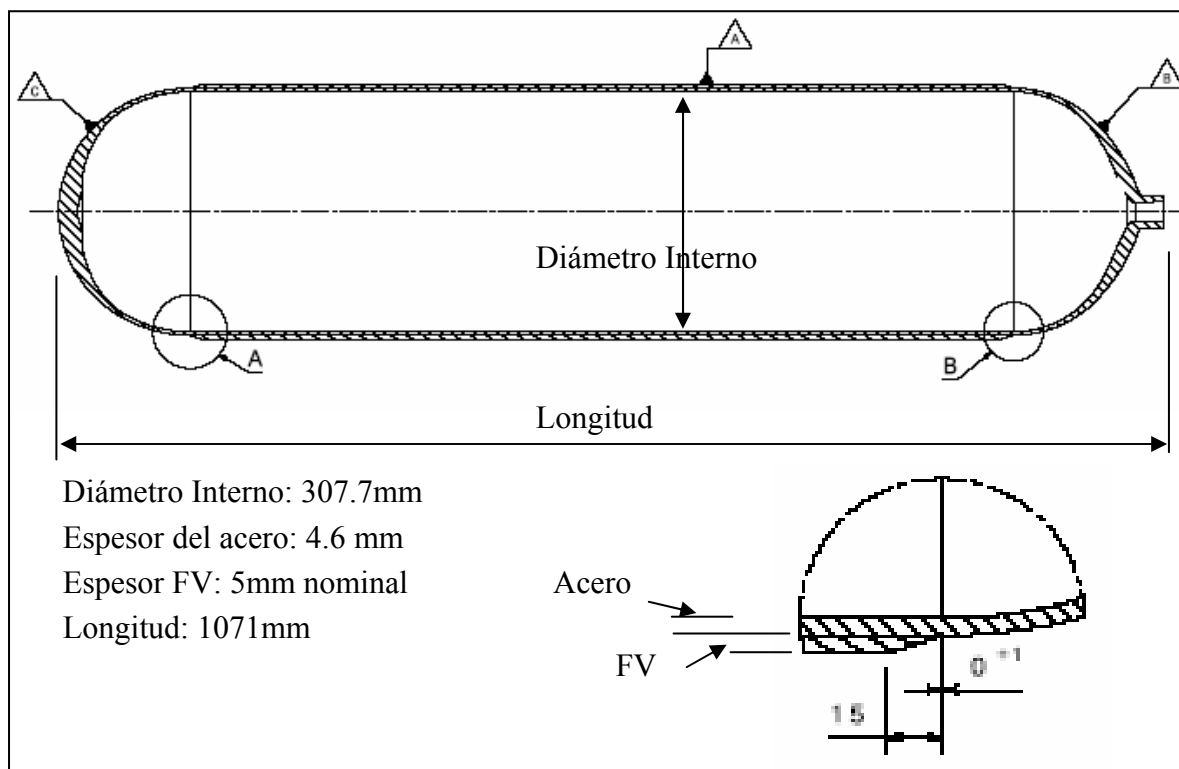


Figura 5: Características geométricas relevantes del cilindro analizado.

3.2 Características de los Materiales

El material del liner (Inflex, 2004) es acero SAE 4130, templado y revenido, la tensión mínima de fluencia es 860Mpa y Máxima de 960Mpa, con un Alargamiento del 14%.

El PRFV está compuesto de Roving directo TEX 2200, en un Porcentaje de fibra en la matriz compuesta: 65 – 75 % en volumen.

La Resina es del tipo epoxi bicomponente en Porcentaje de resina en la matriz compuesta: 25 – 35 % en volumen.

El recubrimiento es de base poliuretánica con el 60% de sólidos por volumen, que forma un espesor de película seca de 0,125mm. Dispone de una Resistencia al Impacto de 15.8 N-m, con una Elongación del 32% (Inflex, 2004).

3.3 Relevamiento de Grietas

El cilindro, una vez bobinado y autozunchado, muestra al PRFV agrietado en aros circunferenciales a los largo de toda su superficie.

De una muestra de PRFV del bobinado de un cilindro de GNC Tipo 2, se pudo determinar con aproximación el espaciamiento entre grieta y grieta en el PRFV. La Figura 6, 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.

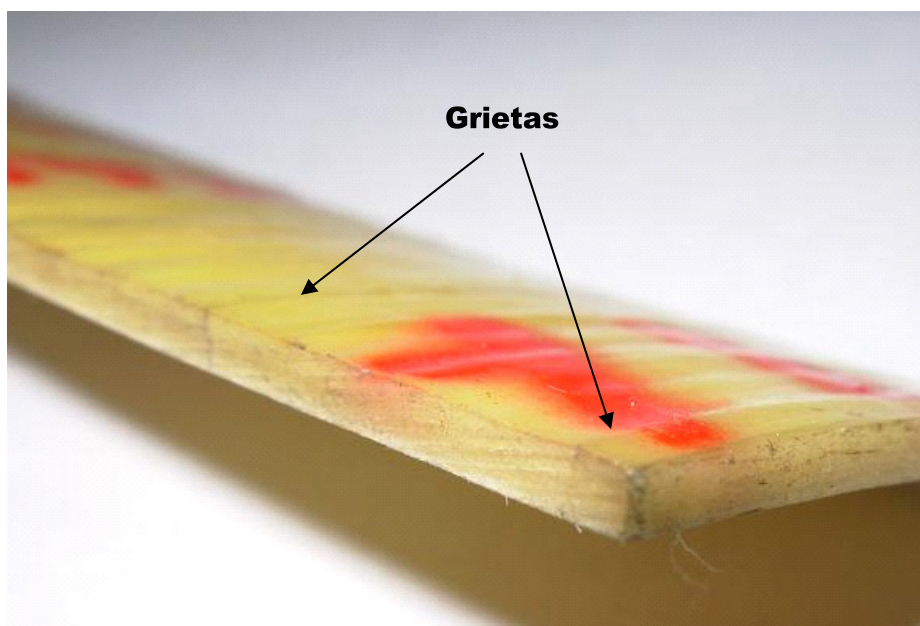


Figura 6: Muestra de PRFV, donde se visualizan las grietas a en el espesor.

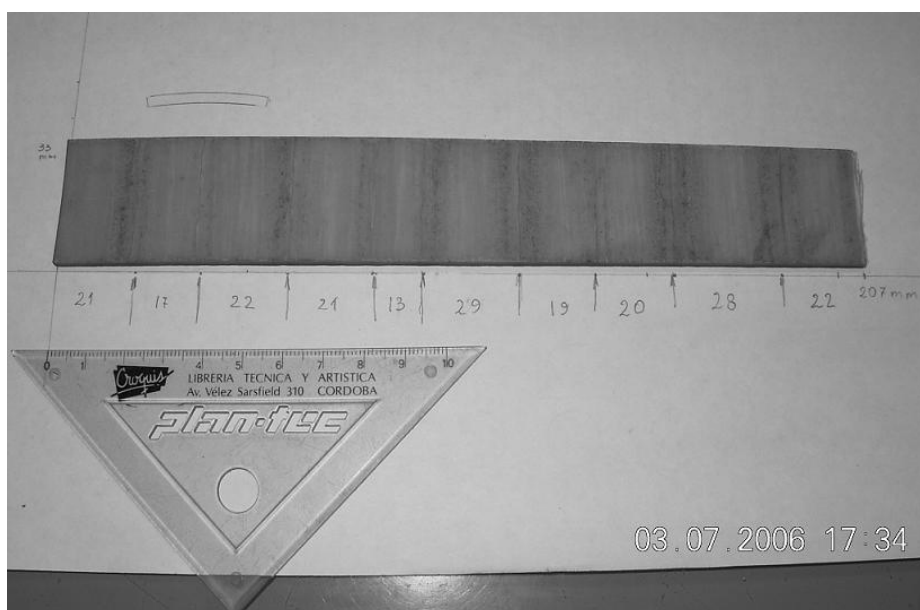


Figura 7: Muestra de PRFV, donde se visualizan las grietas a en el espesor.

La Tabla 1 resume las observaciones y mediciones realizada a la muestra de material compuesto extraída de un cilindro tipo 2. (Elaskar, 2006)

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

4 ANÁLISIS NUMÉRICO DEL CILINDRO

Para las simulaciones numéricas, se utilizó el software ABAQUS/Standard, v6.54, Student Version. El Hardware utilizado fue una Pentium III 1Ghz, con 512Mb de memoria.

4.1 Modelo de Elementos Finitos

Para determinar la separación que se produce entre las caras de las grietas en el PRFV, fue necesario como primer paso determinar la deformación que se produce en forma axial (longitudinal) en el cilindro.

En un primer “step” de la simulación, 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 (BS7910, 1999). Se utilizó la verdadera presión de zunchado utilizada en el proceso real. 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 (ISO-11439, 2000).

De esta manera se busca determinar la deformación en el sentido longitudinal que se produce en el cilindro. Esta deformación es considerada como la suma de las separaciones entre caras de todas las grietas sobre la superficie del PRFV.

El cálculo se realizó con el Software ABAQUS v6.5 (ABAQUS/Standard, 1994). El modelo se describe a continuación:

Tipo de modelo:	Axilsimétrico
Tipo de elemento:	CAX4R (continuo axilsimétrico, 4 nodos, integración reducida).
N° de nodos:	822
N° de elementos:	640
N° de partes:	2 (liner y refuerzo)
N° de materiales:	2 (acero y PRFV)
Cond. de Contorno:	Simetría longitudinal
Cond. Contacto:	Tie (unido)
Etapas:	3 Steps (zunchado, 0bar y 200 bar)
Diámetro interno:	307.6 mm
Espesor de acero:	4.7 mm
Diámetro ext.liner:	317.0 mm
Espesor de PRFV:	5.0 mm
Diámetro ext. Tubo:	327.0 mm
Long. Total:	535.5 mm
Long. Parte cilind.:	400.0 mm

En referencia a los materiales se utilizaron los siguientes valores en “Elastic”, para el Acero:

Módulo Elástico : 207000 Mpa

Módulo de Poisson: 0.3

Características plásticas, introducidas en el comando “Plastic” y se resumen en la Tabla 2.

Tensión	Def. plástica
960	0
969	0,01
995	0,03
1040	0,06
1055	0,10
1200	0,77

Tabla 2: Valores de la curva de plasticidad del acero.

Para el PRFV se asignaron propiedades ortótropas, mediante el comando “Engineering Constant”, que se aprecian en la Tabla 3 (ABAQUS/Examples, 1994).

E1	E2	E3	Nu12	Nu13	Nu23	G12	G13	G23
8000	8000	40000	0,3	0,25	0,25	1300	3000	3000

Tabla 3: Propiedades mecánicas del PRFV.

La orientación se refiere a lo establecido en la Figura 8. de orientación de las fibras en la resina:

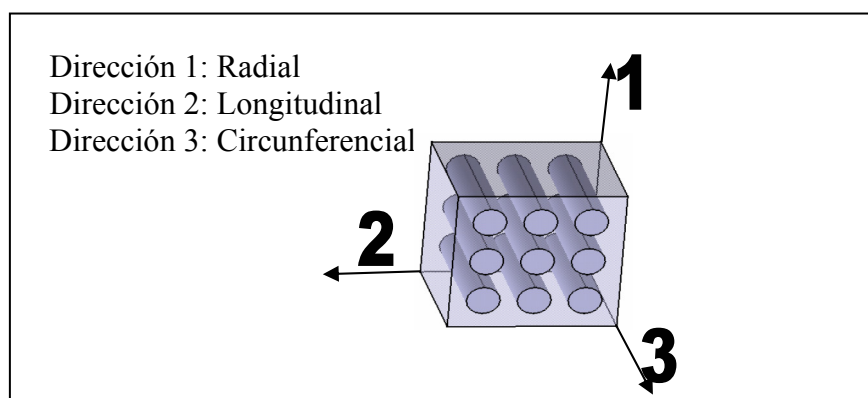


Figura 8: Orientación considerada para el PRFV

Con los dato arriba indicados se construyó el modelo axilsimétrico (Figura 9). Tanto en el liner, como en el PRFV, se han utilizado 5 elementos a través del espesor. Si bien algunos elementos alcanzan una relación de forma mayor a 5:1, en un cálculo para determinar deformaciones, no representa inconveniente importante, además la forma de los elementos es muy uniforme en sus ángulos, lo que favorece a la precisión del cálculo.

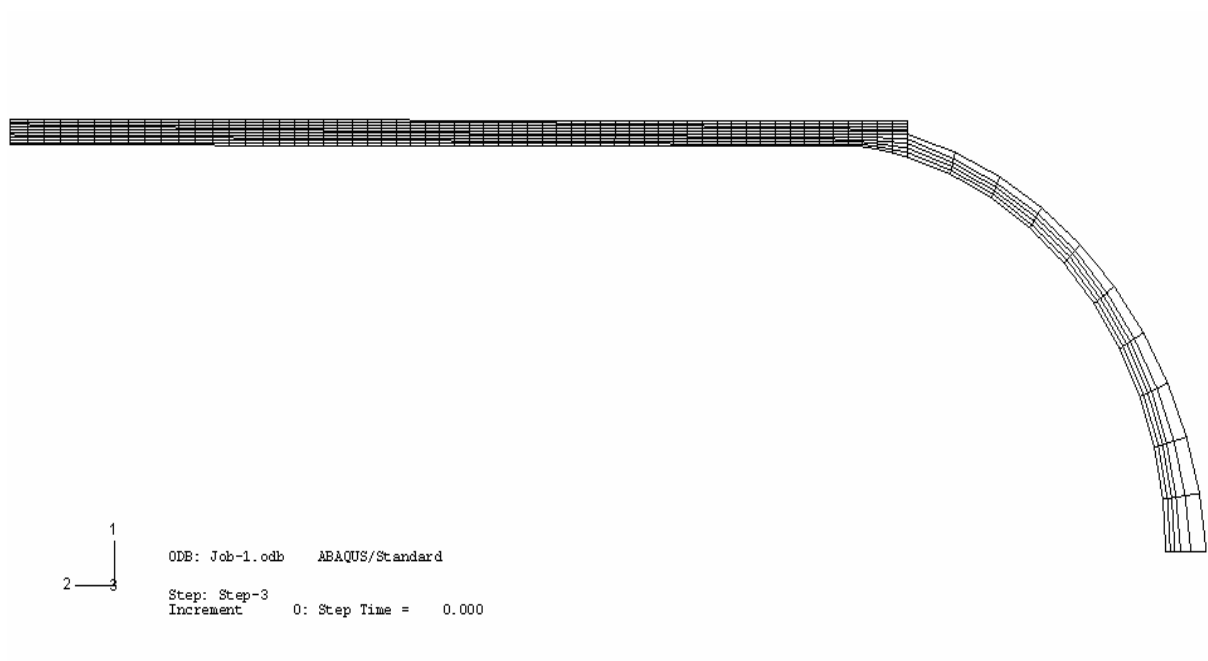


Figura 9: Modelo FEM del cilindro.

4.2 Resultados numéricos del cilindro:

Una vez realizado el “step” del zunchado”, y sin presión interna, la deformación plástica remanente sobre el cilindro puede apreciarse en la Figura 10, aumentada 25 veces.

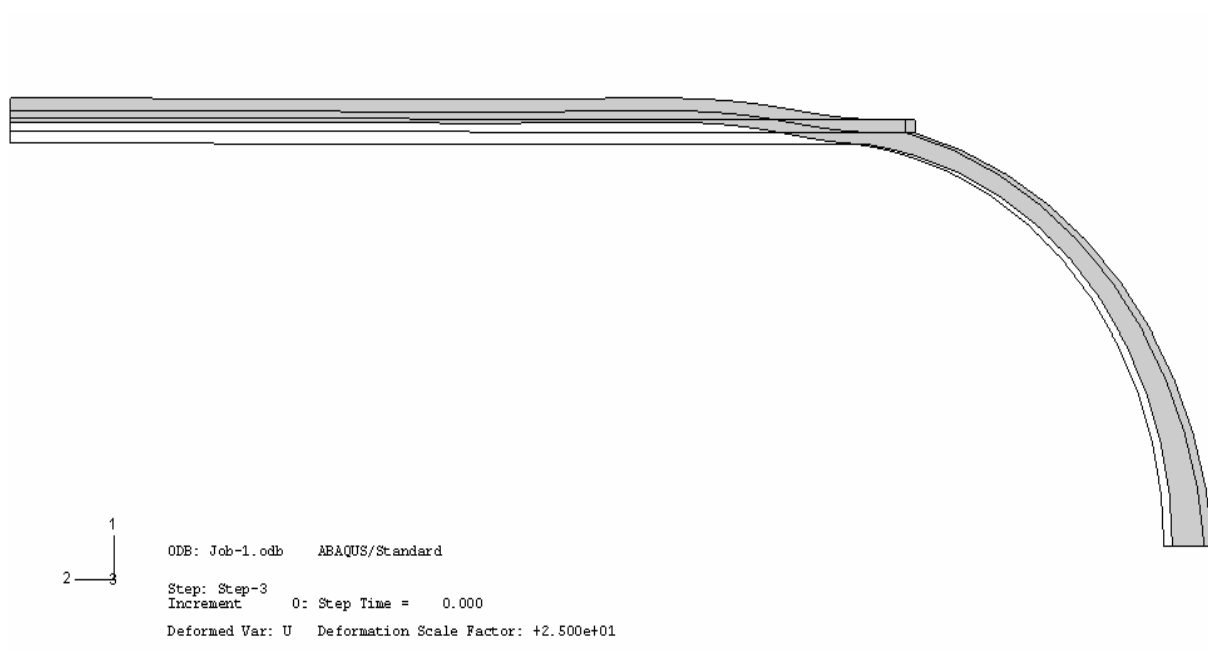
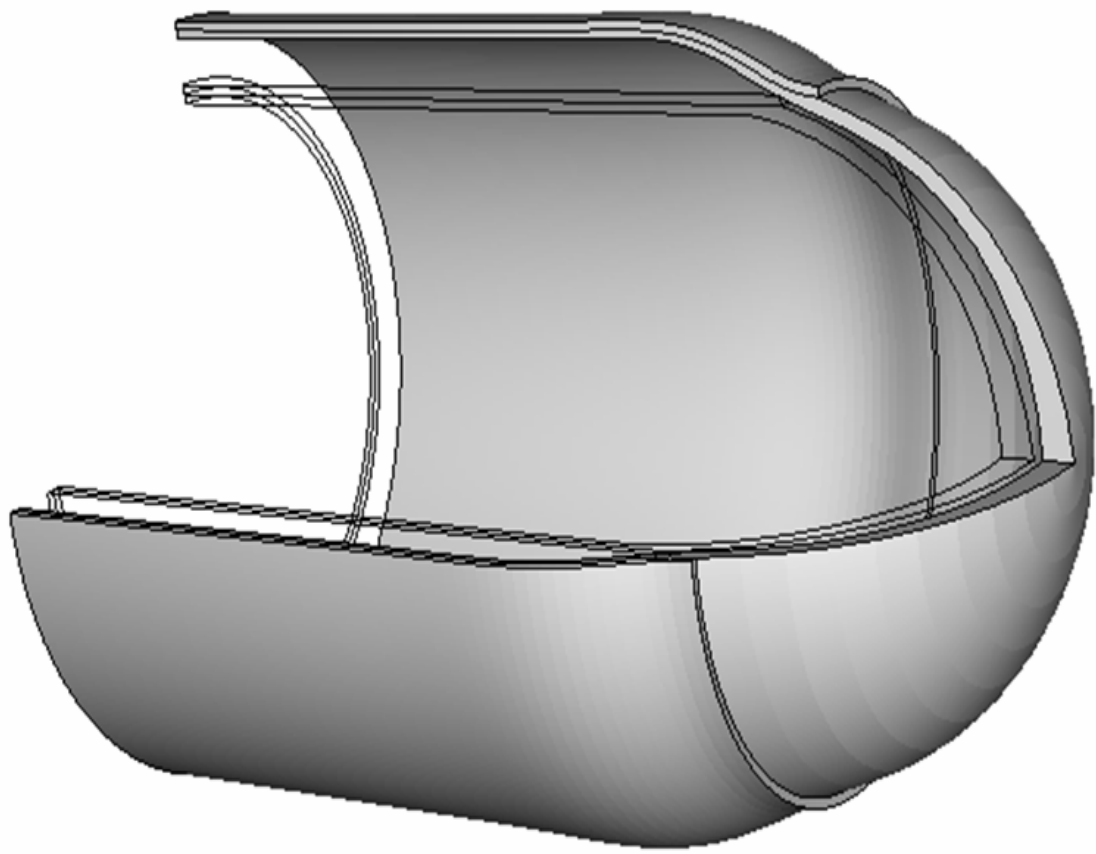


Figura 10: Detalle de la deformación remanente del zunchado, a 0 Bar (x25).

De esta manera se determinó la deformación axial que se produce en el cilindro a lo largo de su eje longitudinal, y relevado en la superficie del PRFV donde se observa la aparición de las grietas en los cilindros reales. La Figura 11 muestra la expansión simulada (x50 veces)



```

ODE: Job-1.odb   ABAQUS/Standard

Step: Step-3
Increment      1: Step Time =    1.000

Deformed Var: U   Deformation Scale Factor: +5.000e+01

```

Figura 11: Expansión del cilindro cargado a 200 Bar. (x50).

De las salidas numéricas, se extrajeron los valores de los desplazamientos del Nodo 82, utilizado como referencia, como lo indica la siguiente Tabla 4.

Eje-Dirección	1	2	3
Coordenadas Iniciales (mm)	163,50	150,00	0,00
Zunchado, y sin presión (mm)	163,82	149,70	0,00
Zunchado, y a 200 Bar (mm)	164,16	149,89	0,00

Tabla 4: Desplazamiento del nodo de referencia del modelo FEM

A continuación (Figura 12) pueden diferenciarse perfectamente los dos materiales considerados, uno en el Liner y otro en el refuerzo exterior. Se detalla la ubicación considerada para relevar los desplazamientos del Nodo de Referencia, para poder medir la deformación longitudinal.

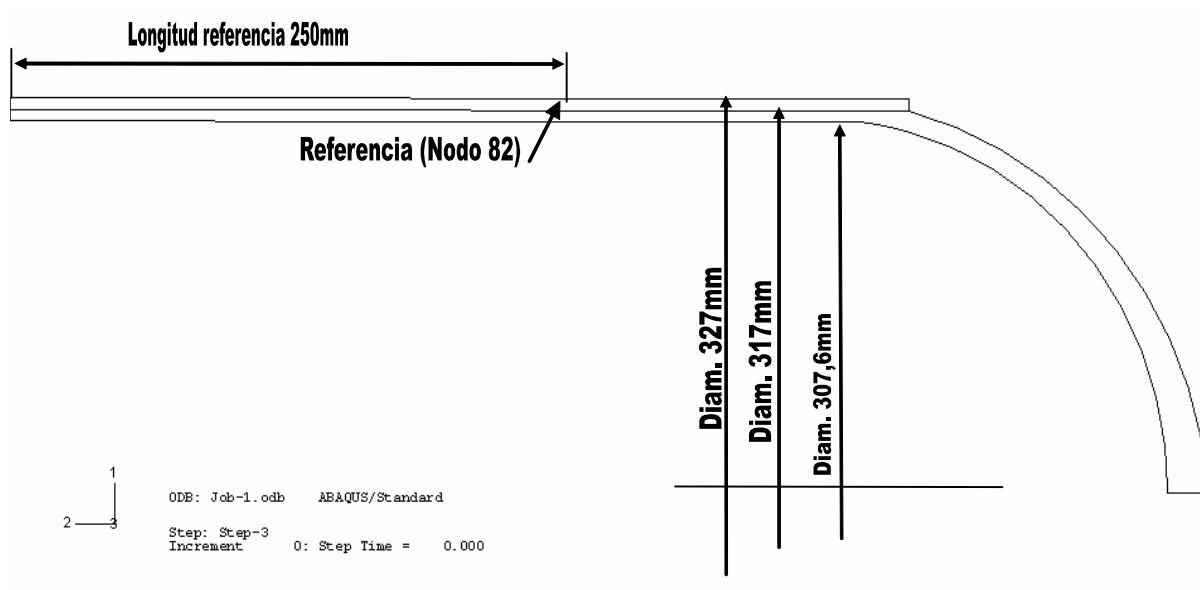


Figura 12: Detalle de dimensiones, y Nodo de referencia en el cilindro.

Se encuentra entonces que el “Nodo 82” de referencia se desplaza una distancia a lo largo del cilindro (eje 2 del modelo) de:

$$D = 0,19 \text{ mm (149,89 - 149,70)}$$

También dicho nodo se desplaza radialmente (eje 1 del modelo) una distancia de:

$$H = 0,34\text{mm (164,16 - 163,82)}$$

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 0,19 mm en 250 mm de longitud de cilindro.

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 250mm, se encuentran casi 12 grietas (250/21.2), con una apertura promedio A de 0,0158mm (0,19/12) de distancia entre las caras de la grieta, cuando el cilindro se encuentra presurizado.

5 ANÁLISIS NUMÉRICO DEL RECUBRIMIENTO

Para estudiar la grieta superficial en el PRFV, se realizó un modelo axilsimétrico del recubrimiento del cilindro.

El modelo 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 (100um) de espesor (Figura 13).

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.

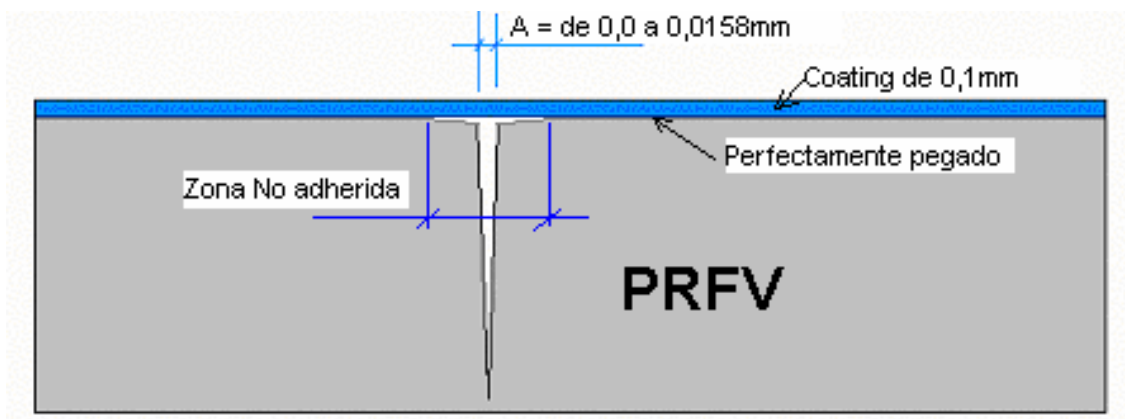


Figura 13: Esquema del modelo de simulación de grieta.

5.1 Modelo FEM del Recubrimiento:

Se realizó un modelo axilsimétrico de 406 elementos (Figura14). Como condición de contorno se supuso simetría en el eje vertical de la grieta. La Figura 14 muestra el modelo realizado.

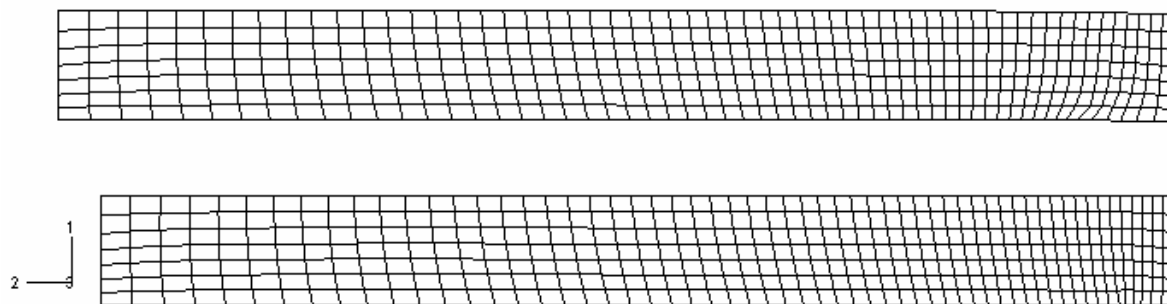


Figura 14: Modelo del recubrimiento y su deformada en 1x0.5, en 2x5 y en 3x1

Como condiciones de contorno adicionales al Recubrimiento, se aplicó un desplazamiento similar a la apertura de la grieta ($A = 0,0158\text{mm}$) 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:	Axilsimétrico
Tipo de elemento:	CAX4I (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/mm²
Alargamiento máximo "A" = 0,32
Módulo de Poisson "u" = 0,33

5.2 Resultados del Cálculo Numérico en el Recubrimiento:

Se observa en la Figura 15, que con los datos introducidos, las deformaciones máximas logarítmicas alcanzan un valor de 29 kg/mm², muy cercana al 32% máximo, en la zona donde se adhiere el recubrimiento al PRFV.

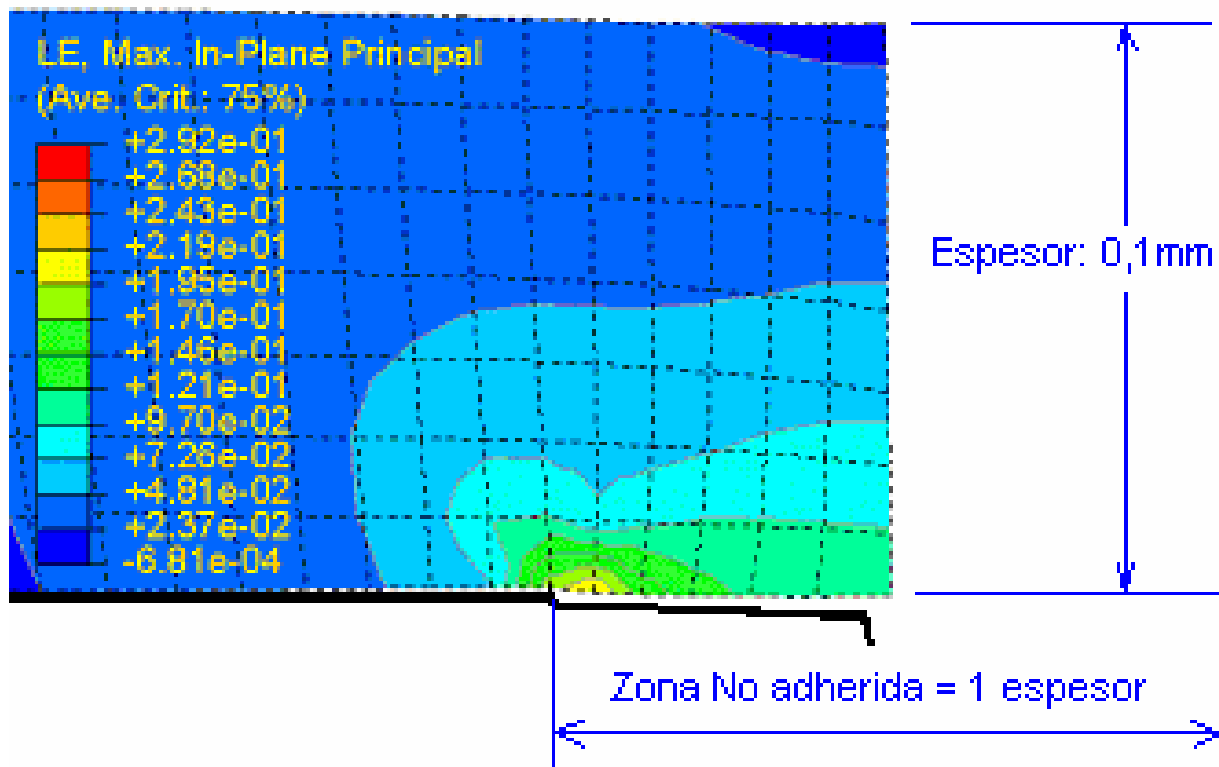


Figura 15: Deformaciones logarítmicas en el recubrimiento (zona No adherida =1 espesor)

Considerando la zona No adherida apenas de un 80% del espesor, las deformaciones en la Figura 16, se concentran ya en forma elevada, alcanzado valores picos de más del 33% de deformación, lo que indica que dicho valor (80% del espesor), se corre riesgo de falla del material.

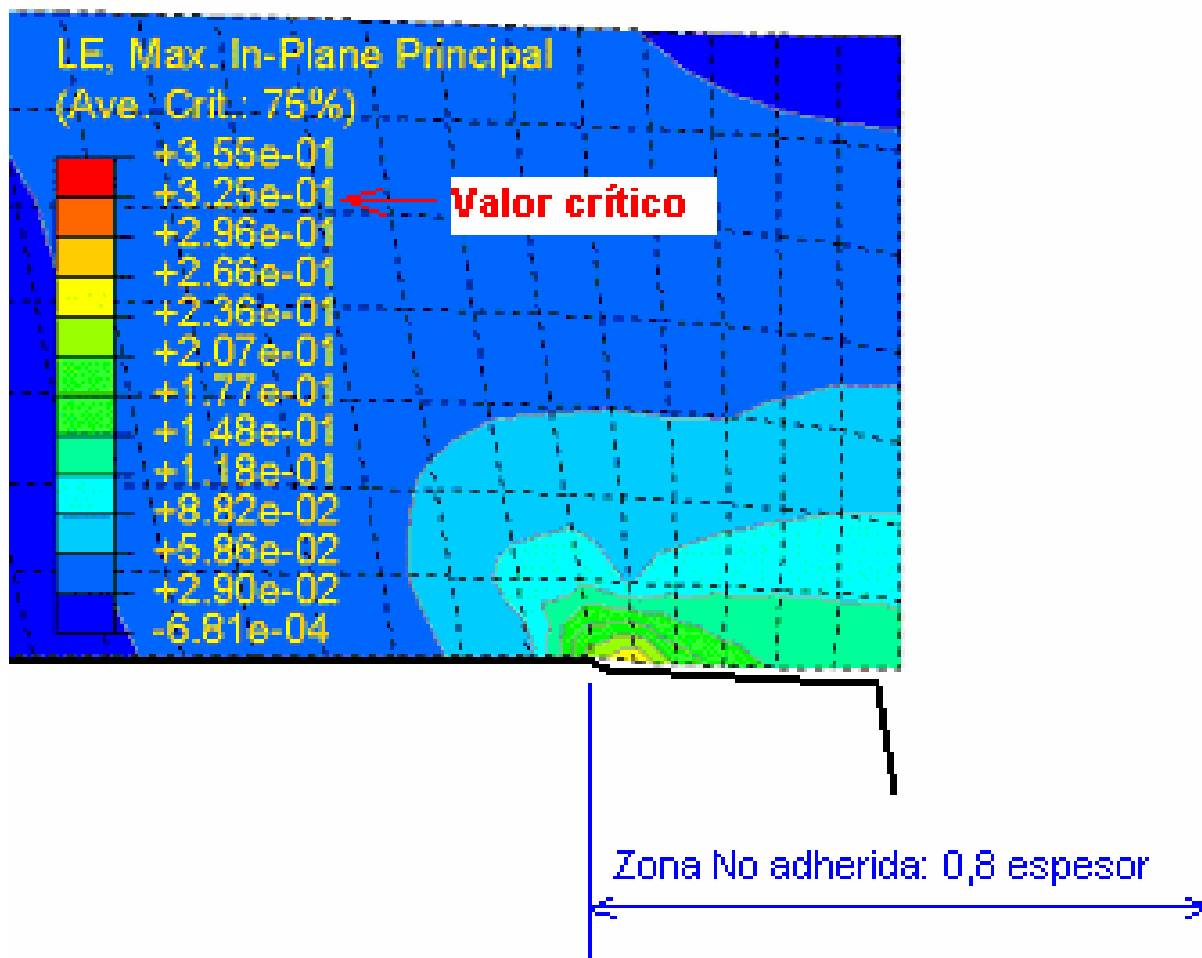


Figura 16: Deformaciones logarítmicas en el recubrimiento (zona No adherida =0,8 espesor)

6 CONCLUSIONES

Del estudio experimental, conjuntamente con el análisis numérico del cilindro, 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, 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, nos indica que se está en una condición conservativa para el cálculo.

Esta consideración previa, indica 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 típicos de bajo módulo), y un alargamiento máximo de no menos del 33%. El espesor de la capa no debe ser menor a una décima de milímetro, valor que se alcanza normalmente en la aplicación de una capa de recubrimiento poliuretánico, que es de 0,125mm.

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

7 REFERENCIAS:

ABAQUS/Examples Manual v5.4. *Hibbit, Karlson & Sorensen, Inc.* 1994

ABAQUS/Standard User's Manual v5.4. *Hibbit, Karlson & Sorensen, Inc.* 1994.

Aguirre Luis, Análisis de falla de cilindros de GNC Tipo 3, *Kalvanco S.A.*, 1992.

BS 7910, "Guide on methods for assessing the acceptability of flaws" *British Standard, Bsi*, 1999.

Darsie Duillo, Los Plásticos Reforzados con Fibras de Vidrio. *Ed. Americalee. Buenos Aires.*1980.

Elaskar, Omar, Informe de proyecto GRF, *Agencia Córdoba Ciencia*, 2006.

Gonzales Reyes, Materiales Compuestos, *Univ. De Navarra, En Internet*
www.tecnun.es/asignaturas/Matcomp/pagina_6.html. 2003.

Inflex, Ensayo de resistencia a los ácidos, *Informe de Certificación de cilindros GNC tipo 2, Argentoil.S.A*, 2004.

ISO-11439, Gas cylinders- High pressure cylinders for the on-board storage of natural gas, *International Standard Org., First Edition*, 2000.

NGV 2000, Basic requirements for compressed natural gas vehicles fuel containers. *CSA International. Coalition, Ohio*, 2000.