

ANÁLISIS DE RECIPIENTES DE PRESIÓN  
CONSTRUIDOS CON RESINAS ARMADAS CON FIBRA DE VIDRIO Y SELLANTE METÁLICO

Ever Barbero\*, Alberto Cardona\*\* y Sergio Idelsohn\*\*  
Grupo de Tecnología Mecánica del INTEC\*\*\*  
C.C. 91, (3000) Santa Fe

RESUMEN

El empleo de los materiales composites, en los que se utilizan distintos tipos de fibras para reforzar una matriz de resina sintética, para la construcción de recipientes de alta presión (500 kg/cm<sup>2</sup> a rotura), permite obtener importantes ahorros en peso y costo. La estanqueidad del conjunto se logra mediante el empleo de un sellante metálico.

En este trabajo se da especial énfasis a los modelos numéricos empleados para el análisis de composites, en lo que atañe a su anisotropía y comportamiento de degradación.

Se trata también el problema que surge al tener que compatibilizar dos materiales tan disímiles como lo son el composite y el metal.

Se presentan además los aspectos del diseño a saber:

- 1) Prediseño y análisis simplificado.
- 2) Diseño de la geometría de cabezales.
- 3) Determinación de las propiedades mecánicas equivalentes del composite.
- 4) Análisis por el Método de los Elementos Finitos, considerado:
  - Material composite formado por varias capas de propiedades ortotrópicas, con modelado de la degradación parcial y total
  - Sellante metálico modelando fenómenos de plasticidad y endurecimiento isotrópico por deformación.

---

\* Becario del COMICET, a quien debe dirigirse la correspondencia.

\*\* Miembro de la Carrera del Investigador del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

\*\*\* Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química dependiente del COMICET y de la Universidad Nacional del Litoral.

#### INTRODUCCION

El objetivo de este trabajo es el análisis de los aspectos de diseño conducentes a la especificación de un recipiente de presión con las siguientes características típicas:

- uso: almacenamiento de gas.
- presión de trabajo: 20 MPa.
- presión de rotura: 50 MPa.

Materiales a emplear en la construcción:

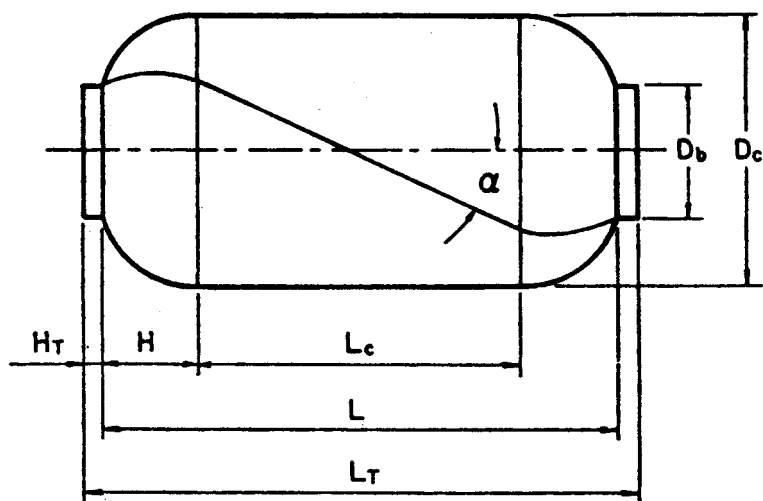
- fibras de vidrio, carbono, etc.
- resinas compatibles con las anteriores.
- sellante metálico liviano.

#### DESCRIPCION

La Fig. 1 muestra la forma típica de este tipo de recipientes. Un análisis membranal simple muestra la conveniencia de reducir el diámetro, pero la longitud máxima para un volumen dado es un parámetro importante en cierto tipo de aplicaciones.

Debido a que el composite presenta fugas de gases al ser sometido a altas presiones, se hace necesario la inclusión de un sellante. Existen varias alternativas para ello, a saber:

- a) sellante de elastómero: en este caso se consigue minimizar el peso y maximizar la utilización de la capacidad resistente de las fibras, pero presenta el inconveniente de que no es totalmente impermeable, quedando entonces restringido su uso para cuando la aplicación de la presión se hace por cortos períodos de tiempo, quedando excluidos entonces los usos industriales.[1]
- b) sellante metálico con capacidad resistente: en este caso se construye un recipiente metálico de paredes gruesas que participa en buen grado en la resistencia estructural del conjunto, no siendo ya el material composite el componente fundamental puesto que este trabaja como refuerzo. De esta forma se obtiene un recipiente comparativamente pesado, si bien mucho menos que uno exclusivamente metálico. Otro inconveniente es que la construcción del recipiente metálico sin soldaduras, requiere tecnología y maquinaria propia, a la que se agregan las propias del composite.



**Figura 1:** Trayectoria de una fibra para bobinado helicoidal y dimensiones principales del recipiente.

- c) sellante metálico liviano: se trata de un recipiente metálico delgado que cumple las funciones de sellante y de mandril para el proceso de bobinado, presenta las ventajas de estanqueidad, bajo peso, facilidad de construcción, etc., razones por las que fue elegido. Sin embargo como veremos su uso complica significativamente el análisis.

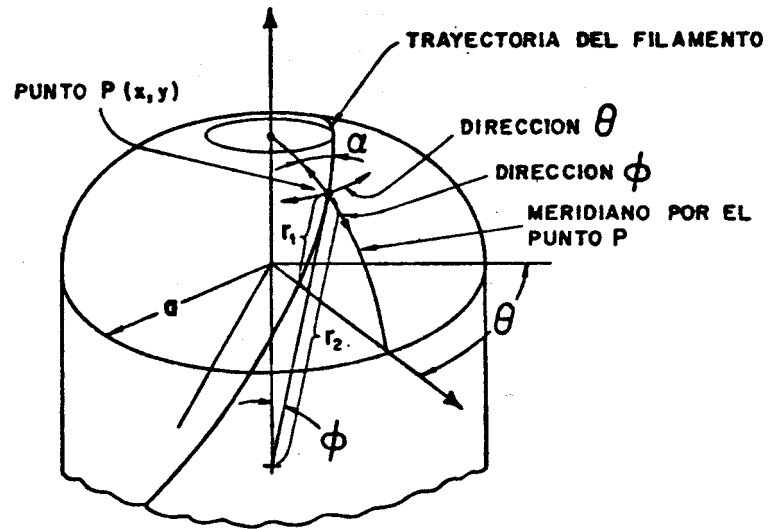
#### FORMA CONSTRUCTIVA

Sobre el sellante metálico liviano se bobina la fibra impregnada en la resina, de forma tal que el sellante quede cubierto totalmente por un número predeterminado de capas siendo el sellante metálico lo suficientemente rígido como para servir de mandril para la operación de bobinado. Diremos que una capa es una cobertura total del sellante, existiendo dos tipos de ellas:

- a) capas longitudinales: para las que el bobinado es del tipo helicoidal. La Fig. 1 muestra la forma del recipiente y la disposición de una fibra en particular, donde el ángulo alfa es el ángulo de bobinado. Un número predeterminado de fibras, depositadas en forma adyacente y consecutiva consiguen cubrir el recipiente con una capa formada por dos subcapas que tienen ángulos  $\pm$  alfa. Por razones de brevedad no se presenta aquí el cálculo cinemático que permite la programación de la máquina bobinadora.
- b) capas circunferenciales: cubren sólo la parte cilíndrica y el ángulo de bobinado es  $\alpha = 90$  grados. Aquí nuevamente la capa está formada por dos subcapas, en este caso idénticas.

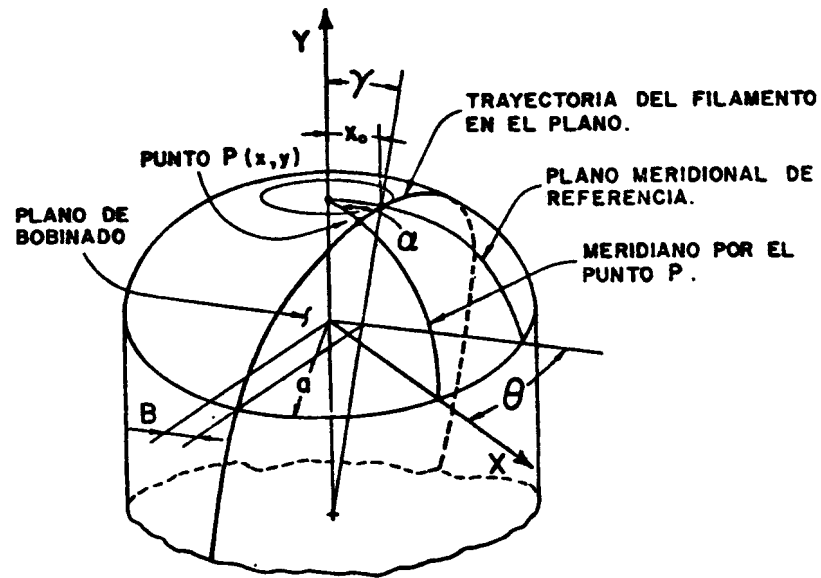
#### Tipos de bobinado:

- a) bobinado helicoidal: se llama así cuando la fibra forma una hélice sobre el mandril. La Fig. 2 muestra una trayectoria típica sobre un cabezal. Se lo obtiene con bobinadoras de mandril rotativo y carro alimentador de desplazamiento longitudinal.
- b) bobinado planar: se llama así cuando la fibra se deposita sobre el mandril formando un plano, inclinado un ángulo alfa con respecto al eje del cilindro. La Fig. 3 muestra una trayectoria típica sobre un cabezal. Se lo obtiene con bobinadoras de alimentador fijo y mandril con dos ejes de rotación.



### GEOMETRIA PARA TRAYECTORIA GEODESICA

Figura 2: Trayectoria de una fibra sobre el cabezal para bobinado helicoidal



### GEOMETRIA PARA BOBINADO PLANAR

Figura 3: Trayectoria de una fibra sobre el cabezal para bobinado planar.

### PREDISEÑO

El predimensionamiento para determinar el número de capas y su disposición se hace utilizando el denominado Netting Analysis [2] que considera:

- sólo la parte cilíndrica del recipiente.
- comportamiento membranaral.
- en cuanto al material se considera solo la resistencia longitudinal de las fibras, despreciándose la resistencia de la matriz.

$$N_{\alpha} = \frac{P \cdot R_i}{2 \cdot t_{\alpha}' \cdot \sigma_r \cdot C_{\alpha} \cdot \cos^2 \alpha}$$

$$N_h = \frac{P \cdot R_i}{t_h' \cdot \sigma_r \cdot C_h} \left( 1 - \frac{\tan^2 \alpha}{2} \right)$$

con:

$N_{\alpha}$  : número de capas longitudinales.

$N_h$  : número de capas circunferenciales.

$\sigma_r$  : tensión de rotura de la fibra.

$C_{\alpha}$  : coeficiente de eficiencia longitudinal.

$C_h$  : coeficiente de eficiencia circunferencial.

$P$  : presión de rotura.

$R_i$  : radio interior del recipiente.

$\alpha$  : ángulo de bobinado longitudinal.

$t_{\alpha}'$  : espesor de una capa longitudinal.

$t_h'$  : espesor de una capa circunferencial.

Los coeficientes de eficiencia se introducen para tener en cuenta las posibles variaciones en los ángulos de bobinado. En general se elige de forma tal de que las capas circunferenciales queden con un coeficiente de seguridad inferior al de las capas longitudinales, pues se de sea inducir un modo de falla longitudinal.

Considerando que solo las capas longitudinales cubrirán los cabeza les y haciendo para estos también un análisis membranaral, se obtiene el mínimo de fibra a utilizar minimizando el ángulo alfa de bobinado. La

Fig. 4 muestra en forma gráfica las relaciones existentes entre el ángulo de bobinado y la cantidad de fibra a emplear. El mínimo valor para alfa está restringido por el diámetro de las bocas y la longitud del cilindro, o por las posibilidades de la máquina bobinadora. Por ejemplo para bobinado planar:

$$\alpha_{\text{mín}} = \arctg \frac{D_b}{L}$$

#### GEOMETRIA DEL CABEZAL

La geometría de los cabezales se diseña de forma tal que la orientación obtenida para la fibra durante el proceso de bobinado, coincida con la resultante de los esfuerzos membranales. A este perfil se lo denomina isotensoide [3].

Para bobinado helicoidal, la trayectoria de la fibra será la de una geodésica, que pase tangente a la boca del cabezal y con un ángulo alfa en la transición cilindro-cabezal, tal como se puede observar en la Fig. 2.

Para bobinado planar la trayectoria de la fibra está dada por la intersección del plano de bobinado con la superficie del cabezal, tal como muestra la Fig. 3.

La forma para el contorno de la superficie de revolución que constituye el cabezal se obtiene mediante la resolución numérica de la ecuación diferencial correspondiente. La Fig. 5 muestra un perfil obtenido para un caso típico. Nótese el achatamiento en relación al cabezal hemisférico, lo que trae aparejada una reducción de la longitud total del recipiente.

Si observamos la trayectoria de la fibra en las Figs. 2 y 3 vemos que para cada punto "p" definido por la distancia X al eje del cilindro, el ángulo alfa entre la fibra y el meridiano que pasa por el punto varía desde el valor alfa inicial sobre el cilindro (ángulo de bobinado) hasta 90 grados cuando pasa tangente a la boca del recipiente de  $X = X_0$ .

El ancho de banda "b" con que se bobina es constante pues depende exclusivamente del número de cabos simultáneos que deposita la máquina bobinadora. El ancho de banda normal al eje del cilindro " $b_n$ " resulta:

$$b_n = b / \cos \alpha$$



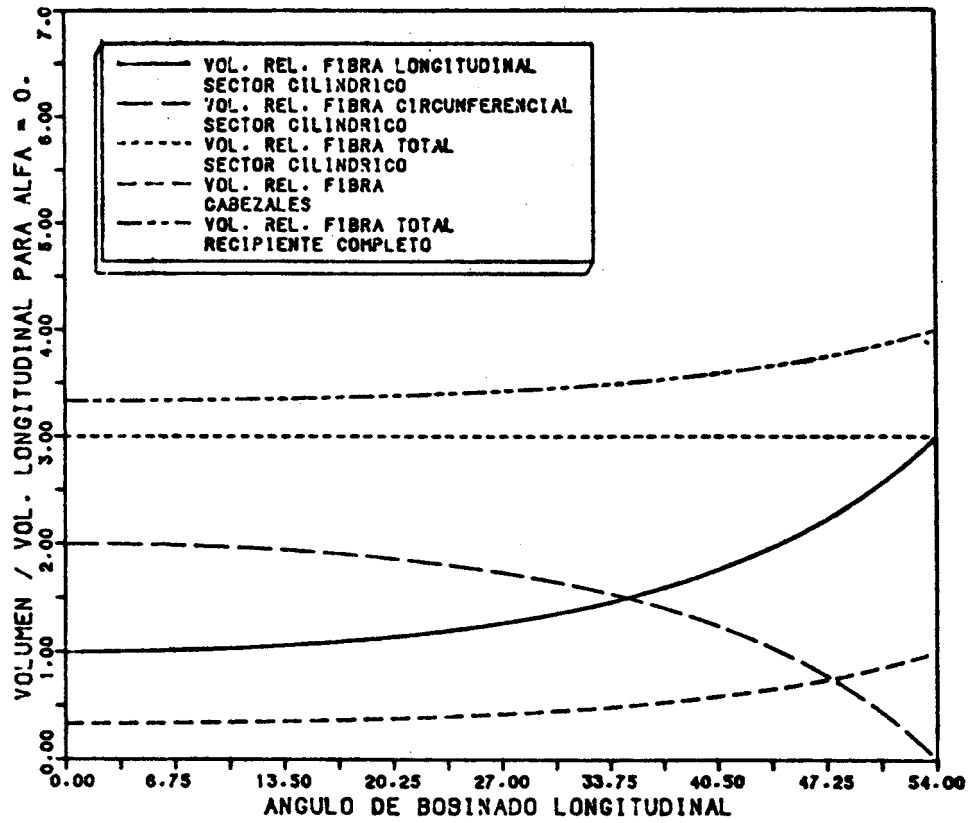


Figura 4: Relación entre el ángulo de bobinado y las cantidades de fibra.

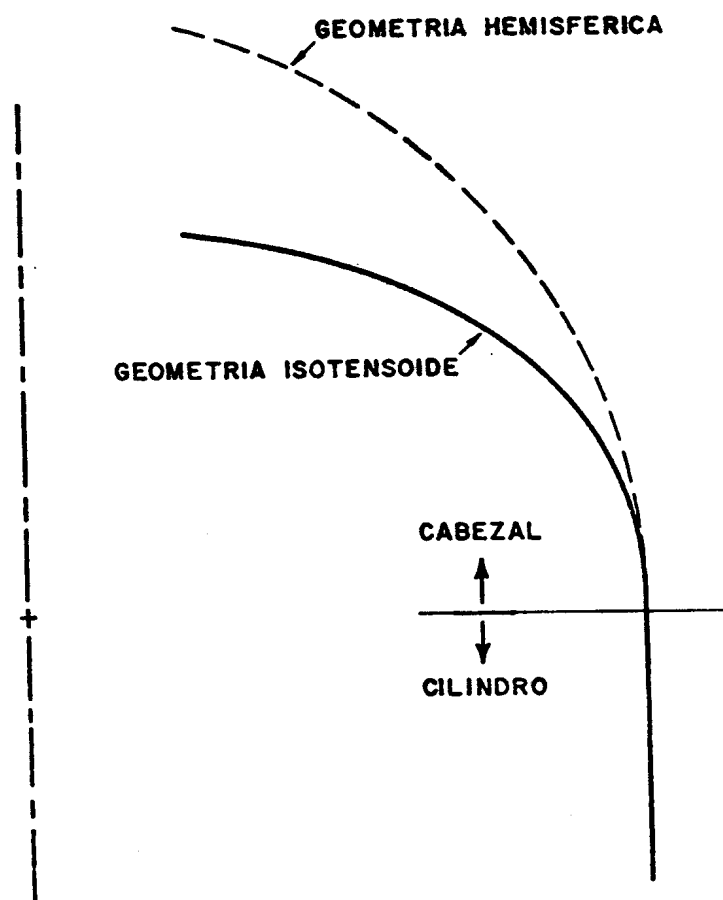


Figura 5: Perfil isotensoide típico.

De ésta se deduce que para un espesor constante de la banda, su ancho " $b_n$ " aumenta en tanto disminuye el radio  $X$  sobre el cabezal. Esto resulta en una superposición cada vez mayor de las distintas capas a medida que se aproximan a la boca del tanque, produciendo un aumento de espesor considerable.

Existe otro motivo por el que se incrementa el espesor y puede explicarse de la siguiente manera. Imáginese que se bobina con  $\alpha = 0$  grados, o sea siempre sobre un meridiano; de esta forma no se produce el efecto descrito en el párrafo anterior. Considérese ahora que el área de fibra en la unión del cilindro con el cabezal es para un espesor  $t_0$  :

$$A = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot t_0$$

Evidentemente la misma área se encontrará para todo radio  $X < R$  siendo entonces el espesor corregido  $t$  :

$$t = \frac{R}{X} t_0$$

Con las dos correcciones al espesor se calcula el perfil exterior del bobinado. Para todos estos cálculos se desarrolló un preprocesador que calcula: el perfil isotensoide, el perfil exterior, el ángulo de las fibras en cada punto y produce una salida apta para el análisis mediante el método de los elementos finitos.

#### CARACTERIZACION DEL MATERIAL COMPOSITE

Comportamiento lineal sin degradación:

Como ya vimos el material composite está formado por un apilado de capas, cada una de las cuales tiene una orientación distinta (ángulo  $\alpha$  respecto al eje del cilindro). En virtud de las grandes diferencias existentes entre las propiedades elásticas en la dirección de la fibra y las mismas en una dirección perpendicular, cada capa presenta un comportamiento fuertemente anisotrópico. Cada capa puede representarse por un modelo ortótropo, siendo uno de los planos de simetría el de la superficie sobre la que se depositan las fibras. Una ulterior simplificación se consigue considerando isotropía transversal a las fibras, que resulta válida para composites bobinados de espesor moderado. El número de parámetros característicos queda entonces reducido a 5 y teniendo en cuenta que "1" es el eje de isotropía transversal son:

$E_1$  : módulo de elasticidad longitudinal.

$E_2$  : módulo de elasticidad transversal.

$G_{12}$  : módulo de torsión.

$\nu_{12}, \nu_{23}$  : módulos de Poisson.

por isotropía transversal se deduce que:

$$E_3 = E_2$$

$$G_{31} = G_{12}$$

$$\nu_{13} = \nu_{12}$$

$$\nu_{23} = \nu_{32}$$

$$G_{23} = E_2/2(1 + \nu_{23})$$

Criterio de degradación:

Como existe una gran diferencia entre las resistencias a roturas de la fibra y de la matriz, esta última se degrada, mucho antes de que el compuesto pierda capacidad resistente. Llamaremos a este fenómeno de degradación parcial, reservando la denominación de degradación total para la rotura de las fibras.

Un criterio de degradación para materiales composites consiste en la especificación de una superficie definida en el espacio de tensiones o de deformaciones, tal que limite los estados posibles de tensión o de formación alcanzables sin degradación parcial.

El criterio de degradación elegido es el de Tsai-Hill [4], que es una extensión del criterio de plasticidad para materiales ortótropos de Hill, basado a su vez en la superficie de fluencia de Von Mises. En ejes de ortotropía de la capa se escribe:

$$F(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + G(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + H(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 2L \tau_{23}^2 + 2M \tau_{31}^2 + 2N \tau_{12}^2 = 1$$

$$F = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{y} + \frac{1}{z} - \frac{1}{x} \right) ; \quad G = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{z} + \frac{1}{x} - \frac{1}{y} \right)$$

$$H = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{x} + \frac{1}{y} - \frac{1}{z} \right)$$

$$2L = \frac{1}{R^2} ; \quad 2M = \frac{1}{S^2} ; \quad 2N = \frac{1}{T^2}$$

donde para isotropía transversal se tiene:

$x$  : límite de rotura en tracción longitudinal.

$y = z$  : límite de rotura en tracción transversal al eje de isotropía.

$R$  : límite de rotura en cizallamiento en el plano perpendicular a las fibras.

$S = T$  : límite de rotura en cizallamiento en el plano de las fibras.

Las limitaciones de este criterio son:

- sólo se expresa en ejes de anisotropía.
- no tiene en cuenta estados de tensión hidrostática.
- no puede tener en cuenta tensiones iniciales.

Si bien existen otros criterios más refinados que permiten evidenciar otros fenómenos, tales como el distinto comportamiento en tracción y en compresión [5], éstos necesitan mayor número de parámetros característicos, los que no son fáciles de determinar. Además el comportamiento observado para el recipiente de presión es fundamentalmente membranar, con algunos efectos flexionales, sin tensiones iniciales, por lo que el criterio de degradación elegido resulta apropiado.

La degradación total se alcanza cuando la tensión en la dirección de las fibras alcanza el valor de la resistencia a rotura en tracción longitudinal, por lo que se elige un criterio de degradación total por tensión máxima.

#### COMPORTAMIENTO POST DEGRADACION

Tanto la degradación parcial como la total de una capa producen dos efectos fundamentales:

- un cambio en la rigidez local, representado por un cambio en la relación constitutiva.
- una relajación y redistribución de tensiones.

La ley constitutiva empleada para representar el comportamiento posterior a la degradación parcial consiste en mantener la rigidez en la dirección de las fibras, anular los términos no diagonales de la matriz constitutiva y reducir la rigidez transversal y a torsión a valores inferiores a los originales, siendo  $E_d$  el módulo de elasticidad transversal degradado y  $G_d$  el módulo de torsión degradado.

La redistribución de tensiones se lleva a cabo mediante dos modelos:

- a) Las tensiones transversales y de cizallamiento son totalmente relajadas con la degradación.
- b) Las tensiones transversales y de cizallamiento se mantienen con el último valor obtenido previo a la degradación. Este modelo es válido para composites bobinados pues si bien con la degradación de la matriz se pierde la capacidad de transmitir esfuerzos de corte, existe un considerable rozamiento entre las capas, otorgando entonces al composite la capacidad de mantener las tensiones alcanzadas al momento de la degradación. La utilización de este modelo presenta buenas propiedades de convergencia que serán comentadas más adelante.

En caso de una descarga, tanto numérica (en el curso de la resolución iterativa del problema no lineal), como una dada por el esquema de carga propuesto, se supone que el material es elástico y representado por la matriz de Hooke degradada.

#### PROPIEDADES MECANICAS DEL COMPOSITE

De acuerdo a los modelos introducidos, las propiedades mecánicas necesarias para el análisis son:

- para la construcción de la matriz de Hooke lineal

$$E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}, \nu_{32}$$

- para la construcción de la matriz de Hooke degradada

$$E_d, G_d$$

- para la construcción de la superficie de degradación

$$X, Y, R, S$$

Idealmente sería necesario contar con las propiedades del composite, determinadas partiendo de muestras confeccionadas en la misma forma en que se habrá de producir el prototipo. Cuando esto no es posible se pueden hacer estimaciones basadas en las propiedades de los materiales intervinientes, a saber fibra y matriz. La regla de las mezclas propone que una propiedad genérica  $E$  se determine en base a la misma propiedad  $E_f$  para la fibra,  $E_m$  para la matriz y los volúmenes porcentuales  $V_f$  de fibra y  $V_m$  de matriz como:

$$E = E_f V_f + E_m V_m$$

De esta forma pueden determinarse con buena aproximación  $E_1$ ,  $\nu_{12}$  y  $X$ . Para  $E_{12}$  y  $G_{12}$  se utiliza el modelo semiempírico de Tsai [4]. Para  $\nu_{32}$ ,  $Y$ ,  $R$ ,  $S$  se obtiene una buena aproximación mediante el uso de los correspondientes valores de la matriz. Los valores más difíciles de determinar son  $E_d$  y  $G_d$ . Para materiales composites no bobinados estos son prácticamente nulos, pero para los bobinados se sabe que no se anulan completamente debido al cruzamiento entre las fibras y a los esfuerzos de compresión entre capas.

#### MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Se utiliza el método de los elementos finitos con una formulación del tipo desplazamiento. El recipiente bajo estudio presenta una geometría de cuerpo de revolución por lo que es posible utilizar un modelo axilsimétrico. La utilización de la teoría de cáscaras queda descartada en este caso por tratarse de espesores grandes y porque la naturaleza estratificada del material composite hace que se presenten importantes deformaciones de corte que dependen de la orientación de las fibras, in validando entonces las hipótesis del tipo Kirchhoff.

Para modelar todo el conjunto pueden seguirse distintas estrategias:

- a) modelar cada capa con un elemento diferente: esto da exelentes resul tados pero el elevado número de grados de libertad necesarios para discretizar una estructura real lo hace impracticable.
- b) establecer propiedades anisotrópicas equivalentes para todo el espesor del compuesto mediante la adopción de hipótesis simplificadoras del tipo Kirchhoff. Esta opción se descartó por las razones antes mencionadas. Además estamos interesados en estudiar el comportamiento post-degradación, que se produce en forma gradual capa por capa. Esto hace que el modelo se torne no lineal, necesitándose entonces la mejor descripción posible del fenómeno para lo cual se hace indis pensable la identificación individual de cada capa y su estado.
- c) la solución de compromiso consiste en utilizar un elemento multicapa. Esto permite reducir drásticamente el número de elementos necesarios y a su vez conservar la individualización de las distintas capas, ne cesaria para el seguimiento de la degradación. El campo de despla-

mientos es único para todas las capas dentro del elemento, desmejorando entonces la calidad de la representación de las deformaciones de corte. Por lo tanto es necesario colocar un número suficiente de elementos en el espesor, en aquellas zonas en las que se esperan esfuerzos cortantes importantes.

#### Modelado del sellante metálico:

Como vimos el sellante está constituido por una capa metálica delgada, que no participa en gran medida en la carga estructural del conjunto. Las deformaciones están entonces determinadas casi exclusivamente por el composite.

Por razones de costo se intenta utilizar la fibra tipo "E", de la que hay producción nacional. Esta posee un módulo de elasticidad típico de 72,4 GPa, una resistencia a rotura de 1,4 GPa con una elongación de rotura de 1,9 %. Para aprovechar lo más posible esta gran resistencia a rotura es necesario incursionar en grandes deformaciones, teniendo en cuenta que el módulo elástico es reducido. La compatibilidad de desplazamientos entre el sellante y el composite indica que estas deformaciones serán alcanzadas en el campo plástico del sellante, mientras que el composite se encuentra siempre en el campo elástico. Por ejemplo la deformación de fluencia del aluminio es 0,56 %. Durante la descarga del recipiente, se produce la recuperación elástica del compuesto con una casi total reducción de las tensiones membranales de tracción, en tanto que el sellante quedará sometido a importantes tensiones de compresión. Este es quizá el principal limitante del diseño ya que no se puede permitir la plastificación por compresión. Es necesario aclarar que la plastificación se producirá sólo una vez, durante el proceso de pretensado inicial, que consiste en llevar el recipiente a 5/3 de la presión de trabajo, y luego el sellante trabaja siempre en el campo elástico.

#### Análisis sobre la parte cilíndrica:

Para llevar a cabo este análisis se modela una porción cilíndrica, tal como indica la Fig. 6. Para ello se fijan los grados de libertad en la dirección axial sobre la superficie A, y sobre la superficie B se impone una restricción entre los grados de libertad de dirección axial para que todos los desplazamientos sean iguales. Las cargas están dadas por la presión interna, introducida por un sistema de fuerzas energéticamente equivalentes y la carga axial correspondiente al efecto de la presión sobre los extremos del recipiente que viene dada por:



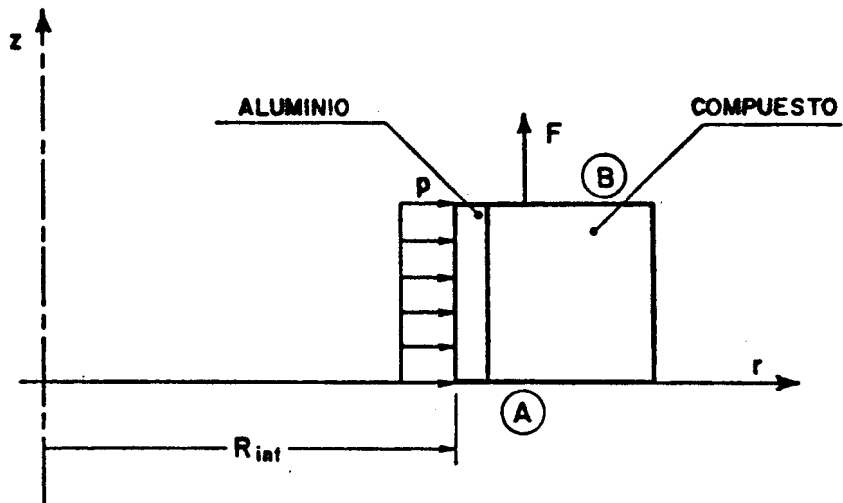


Figura 6: Modelo de elementos finitos para el sector cilíndrico del recipiente.

$$F = P \cdot \pi \cdot R_i^2$$

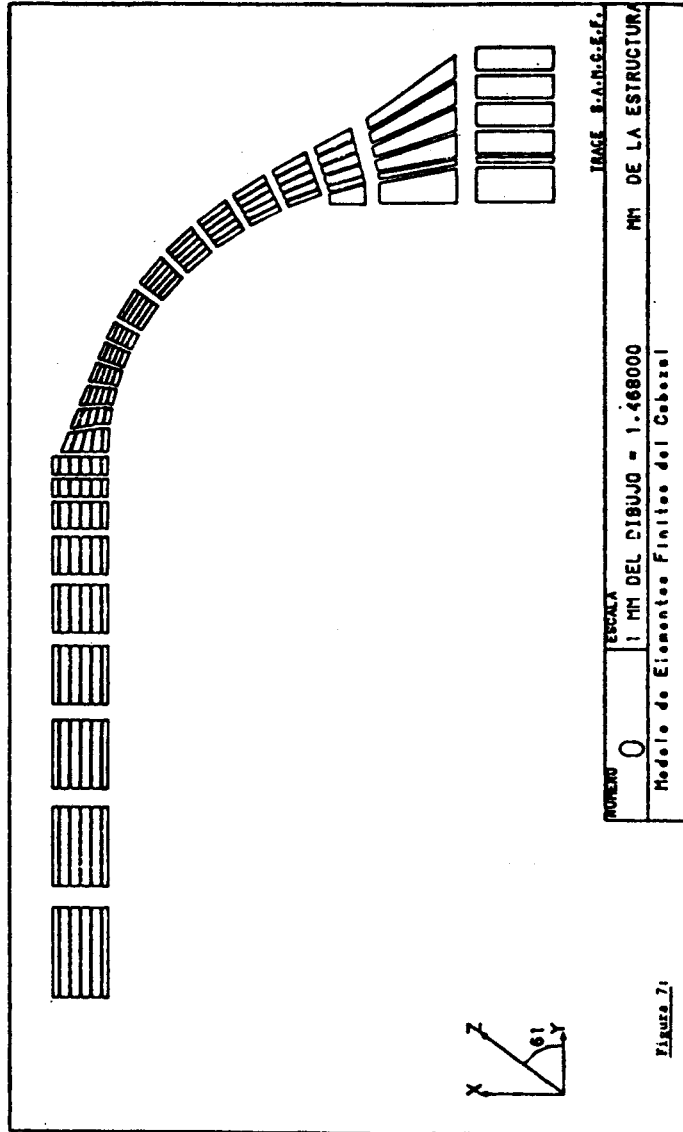
Se utilizan las siguientes historias de carga:

- a) carga creciente hasta la presión de rotura (2,5 de la presión de trabajo): como ya observamos el modelo se hace no lineal por la degradación parcial del composite. El algoritmo de resolución no lineal es el de Newton-Rapson modificado con previsión para asegurar la reversibilidad incremental durante las descargas [6,7,8]. Dado el número reducido de grados de libertad involucrados fue posible llevar a cabo varios análisis con las dos hipótesis de redistribución de tensiones. Los resultados muestran que el método usado para el predimensionamiento introduce un sobredimensionamiento, por lo que es necesario hacer un reajuste del número de capas a emplear.
- b) carga creciente hasta la presión de prueba (5/3 de la presión de trabajo) y posterior descarga hasta presión nula: se observa que solamente con la hipótesis "b" sobre redistribución de tensiones es posible obtener resultados satisfactorios para la descarga total.

Análisis sobre el cabezal:

La Fig. 7 muestra la discretización empleada. Sobre el cabezal sólo van dispuestas las capas longitudinales, por lo que es necesario hacer una transición del cilindro al cabezal a fin de obtener una variación suave del espesor y evitar picos de tensión y deformación, que pueden producirse por efectos de flexión. La Fig. 8 ilustra la solución adoptada entre todas las que se ensayaron. Consiste en continuar las capas circunferenciales sobre un corto tramo del cabezal. De esta forma puede obtenerse la distribución meridional de tensiones en la dirección de la fibra que se muestra en la Fig. 9, para las capas interior y exterior del composite. Los valores máximos observados se corresponden con la flexión observable en la deformada que se muestra en la Fig. 10. Es de notar además que la zona de la boca del recipiente queda sumamente reforzada debido al aumento considerable de espesor. La Fig. 11 muestra la distribución meridional de las deformaciones plásticas en el sellante para la presión de prueba.

La degradación parcial del composite comienza en la zona interna de la transición cilindro-cabezal y se propaga en dirección al cabezal y al cilindro a medida que aumenta la presión interna en el recipiente.



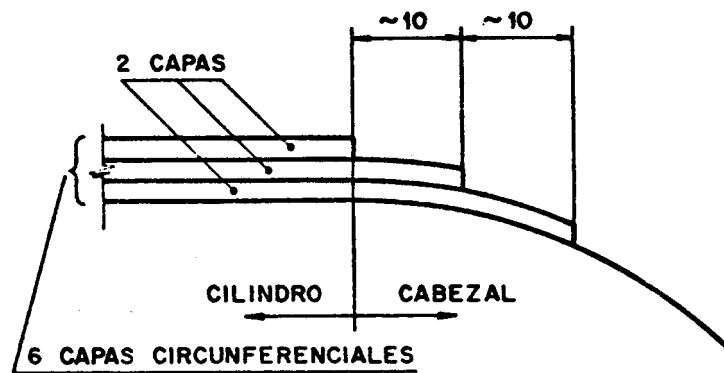
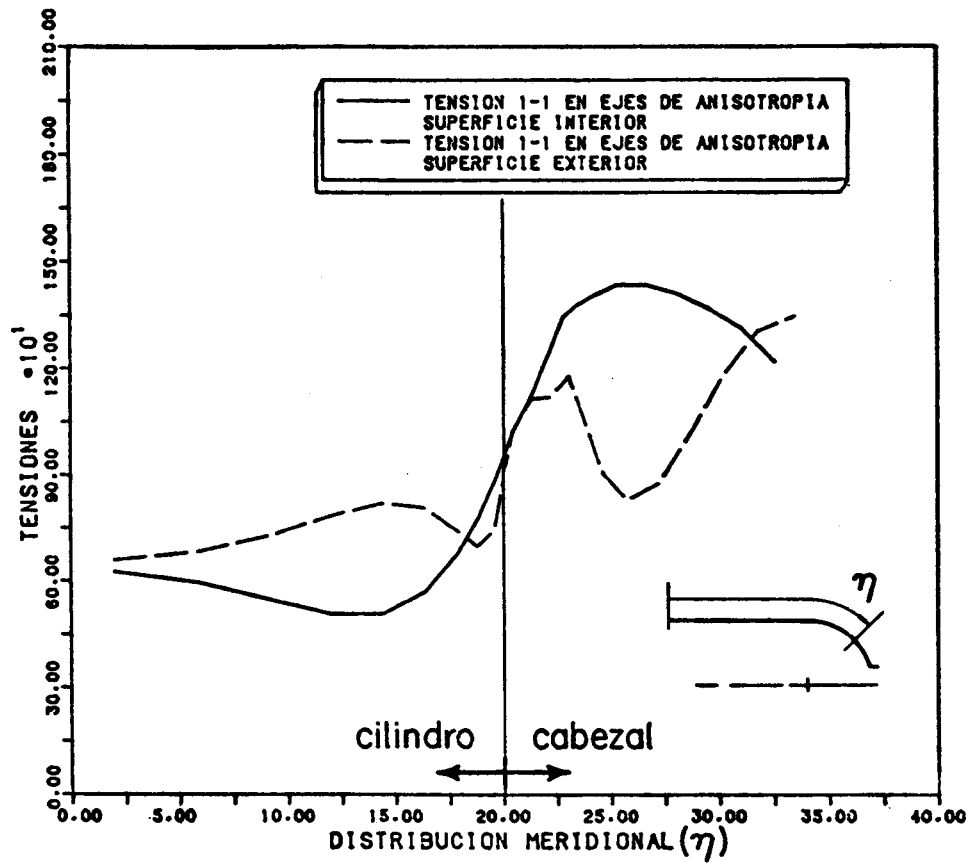
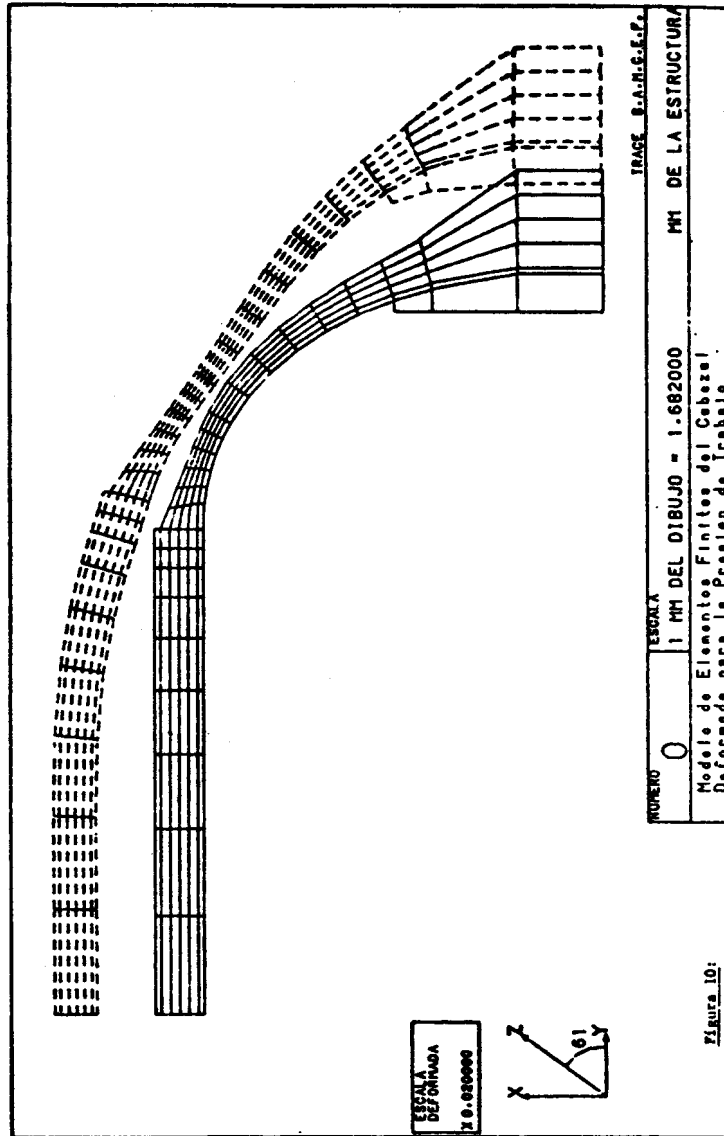


Figura 8: Esquema de la solución adoptada para la transición cilindro-cabezal.



**Figura 9:** Distribución meridional de tensiones en la dirección de la fibra para las superficies interior y exterior del composite, para la presión de trabajo.



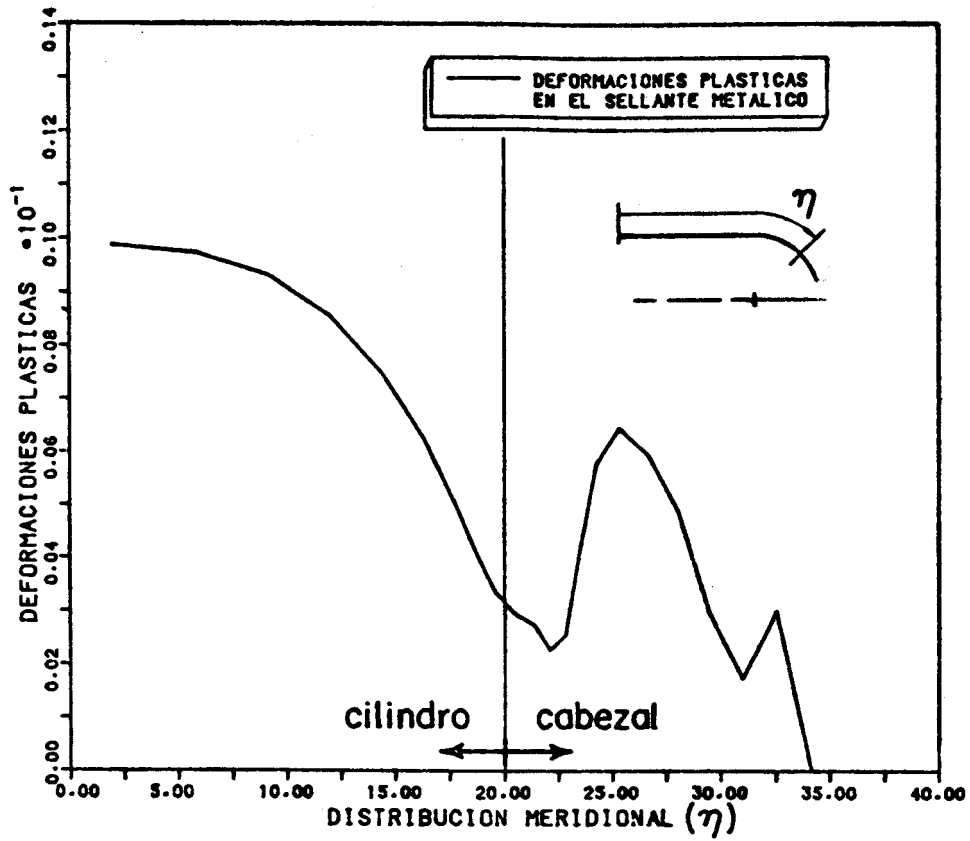


Figura 11: Distribución meridional de deformaciones plásticas en el sellante metálico para la presión de prueba.

La hipótesis "b" de redistribución de tensiones, en la que se mantienen las tensiones de corte alcanzadas al momento de la degradación, presenta buenas propiedades de convergencia, habiendo sido posible completar la historia de carga hasta la presión de rotura.

En cambio la hipótesis "a", en la que las tensiones de corte son totalmente relajadas al momento de la degradación, presenta pobres propiedades de convergencia. Aún utilizando pequeños incrementos de carga, la convergencia es sumamente lenta y en algunos casos impracticable. Esto se debe a que la relajación total de las tensiones de corte produce una gran redistribución de tensiones, que impide que se encuentre la configuración de puntos degradados que lleva a la convergencia.

#### CONCLUSIONES Y POSIBILIDADES DE ESTUDIO FUTURAS

El método de los elementos finitos resulta una herramienta apta para el estudio de recipientes de presión construidos con materiales compuestos, pues permite gran flexibilidad para representar modelos fenomenológicos del material.

Surge la necesidad de apoyar estos modelos con estudios experimentales de caracterización.

Ciertos mecanismos, como el de descarga post-degradación no se encuentran suficientemente estudiados, siendo necesario plantear modelos apropiados para el análisis numérico de componentes de uso industrial, donde la naturaleza cíclica de las cargas es imperante.

Por último, nos preocupa la estabilidad del sellante metálico cuando, estando el recipiente descargado, se halla sometido a importantes esfuerzos de compresión.



REFERENCIAS

- [1] Ladoire, D., Breval, Y., Auberon, M.; "Capacités en matériaux composites pour le stockage des fluides sous haute pression", S.N. I.A.S. Etablissement d'Aquitaine.
- [2] ASME Pressure Vessel Code XI, Fiberglass Reinforced Plastics, Appendix 1.
- [3] Shibley, A.M.; "Handbook of composites, Section II", Cap. 16. George Lubin Ed.
- [4] Tsai, S.W.; "Strength characteristics of composite materials". NASA CR-225, 1965.
- [5] Idelsohn, S., Laschet, G. et Nyssen, C.; "Pre- and post-degradation analysis of composite materials with different moduli in tension and compression". Rapport L.T.A.S. SA-82, Université de Liege, (1980).
- [6] Nyssen, C.; "Modelisation par elements finis de comportement non lineaire de structures aerospaciales". Universite de Liege, (1978).
- [7] Laschet, G.; "Description d'un element multicouche pour L'Analyse des resines armees". Rapport L.T.A.S. SF-98, Universite de Liege, (1980).
- [8] SAMCEF - Sistema para análisis de medios continuos por elementos finitos. Universidad de Liege.