

## DISEÑO DE UNA VENTANILLA DE OBSERVACIÓN PARA UNA CÁMARA HIPERBÁRICA

### DESIGN OF AN OBSERVATION WINDOW FOR A HYPERBARIC CHAMBER

César A. Lanz<sup>a</sup>, Daniel H. Felix<sup>a</sup> y Bruno La Rocca<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Departamento de Ingeniería, Instituto de Ingeniería (IIUNS)-CIC, Universidad Nacional del Sur,  
Bahía Blanca, Argentina, clanz@uns.edu.ar, dhfelix@uns.edu.ar, <http://www.uns.edu.ar>*

<sup>b</sup>*Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina, ,  
<http://www.uns.edu.ar>*

**Palabras clave:** Integridad mecánica, Recipientes a presión, Equipamiento Médico.

**Resumen.** El trabajo propuesto consiste en el diseño de un orificio a practicar en el cuerpo cilíndrico de una cámara hiperbárica. El motivo de agregar un orificio a la misma, es permitir colocarle una ventanilla de observación. El equipo, consiste fundamentalmente en un recipiente estanco, que opera con fluido a presión hasta una presión máxima de  $2 \text{ Kg/cm}^2$ . La cámara se emplea en tratamientos médicos y en oxígeno-terapia. La propuesta se basa en el estudio de varios diseños de ventanilla hasta lograr un diseño adecuado que cumpla con los fines propuestos de observación, y a la vez con la normativa específica vigente ASME PVHO-1 de recipientes a presión. La optimización se logrará utilizando métodos de simulación numérica. Se realizará este análisis considerando el caso particular de una cámara hiperbárica de 4600 mm de longitud total (entre cabezales) y un diámetro de 1800 mm, de disposición horizontal, apoyada en sus soportes. La misma está fabricada en chapa IRAM F24 de 10 mm de espesor.

**Keywords:** Mechanical integrity, pressure Vessel, medical equipment.

**Abstract.** The proposed work consists in the design of a hole to be practiced in the cylindrical body of a hyperbaric chamber. The reason for adding a hole is to allow an observation window to be attached to the camera. The hyperbaric chamber basically consists of a watertight container, which operates with pressurized fluid up to a maximum pressure of  $2 \text{ Kg/cm}^2$ . The camera is used in medical treatments and oxygen therapy. The proposal is based on the study of various window designs until achieving a suitable design that complies with the proposed purposes of observation, and at the same time with the current specific regulation ASME PVHO-1 of pressure vessels. Optimization will be accomplished using numerical simulation methods. This analysis will be carried out considering the particular case of a hyperbaric chamber of 4600 mm in total length (between heads) and a diameter of 1800 mm, horizontally arranged, supported by its supports. The chamber is built with a 10 mm thick IRAM F24 sheet.

## 1. INTRODUCCIÓN

El empleo de la medicina hiperbárica, para tratar distintas patologías, mediante el cambio en la presión atmosférica, se inició en 1664 cuando Benjamin Henshaw [Lee \(1891\)](#), empíricamente afirmaba que el aumento de la presión atmosférica era ventajosa para el tratamiento de ciertas patologías crónicas como la artritis, además de las patologías agudas, como la fiebre e inflamaciones. En la década de 1930, Francia era el líder en el desarrollo de la medicina hiperbárica. En ese entonces se empleaban tratamientos de pacientes que se sumergían, a una profundidad que podía variar entre los 10 y 30 metros, con el objetivo de mejorar la circulación en los órganos internos, la circulación cerebral y fundamentalmente producir una sensación de bienestar. En dicho país se trataban también con la medicina hiperbárica, otras patologías tales como tuberculosis, laringitis, sorderas, cólera y conjuntivitis.

Ya en el año 1850 funcionaban en Europa varias cámaras hiperbáricas, y en 1879, [Fontaine \(1879\)](#), [Jones et al. \(2020\)](#), construyó su cámara hiperbárica multiplaza, que permitía tratar a más de un paciente simultáneamente. En los pacientes tratados con dicha cámara, Fontaine observó una rápida recuperación de los efectos de la anestesia, un menor grado de las cianosis e hipoxias y la disminución de la excitación y de los vómitos posteriores a la aplicación de la anestesia. En el año 1933 Damant y Philip, [Mauvecin \(2011\)](#), comienzan a utilizar la cámara hiperbárica posteriormente a las prácticas de buceo, para mejorar la absorción del oxígeno y de esa manera disminuir los tiempos de descompresión en el grupo de buzos de la Armada Británica. En USA, en el año 1967 se funda la *Undersea Medical Society*, y paralelamente en otros países las sociedades científicas dedicadas a la medicina hiperbárica tales como la italiana, japonesa y sudafricana. Recién en la década de 1960 en la República Argentina comienza a ser usada la técnica denominada comúnmente “oxigenoterapia” por los Dres. Rosasco, Wilkinson y Calori en el Leprosario de General Rodríguez (Pcia de Bs As), especialmente en el tratamiento de lepra y en la Base Naval de Mar del Plata, donde se han realizado gran cantidad de tratamientos. En el año 1986 fue fundada la *Sociedad Argentina de Medicina Hiperbárica y de Buceo*. Las cámaras hiperbáricas básicamente están construidas para el tratamiento de los pacientes y normalmente son cilíndricas de disposición horizontal.

## 2. MATERIALES Y METODOLOGÍAS UTILIZADOS

### 2.1. Cuerpo Cilíndrico

El recipiente cilíndrico de base que se encuentra apoyado en sus dos soportes para conformar la cámara hiperbárica, como recomienda Megyesy, [Megyesy \(2001\)](#), se muestra de manera simplificada en la Figura 1. Se trata de un cilindro de 1800 mm de diámetro exterior, 4600 mm entre cabezales y opera a una presión de 0,2 MPa. Se pretende generar en ella, una ventanilla de observación en la zona media del cilindro, que está conformado en chapa IRAM F24, de 10 mm de espesor, la cual tiene una tensión de fluencia de 235 MPa.

Para ello se practica un orificio de 150 mm de diámetro, lo que implica, a los efectos del cálculo de tensiones en la zona afectada, retirar del cuerpo cilíndrico un área transversal de 150 mm por 10 mm, es decir de  $1500 \text{ mm}^2$ . La presencia del orificio provocará una alteración en la distribución de tensiones mecánicas o concentración de tensiones, generando zonas con tensiones considerablemente más elevadas, respecto de las presentes antes de practicar el orificio.

En casos extremos puede producirse un marcado debilitamiento del material en la zona adyacente al orificio y alcanzar el régimen plástico del material. De manera que se hace necesario reforzar la zona adyacente al orificio practicado, Cheema y sus colaboradores, [Raza Cheema et al. \(2019\)](#), mediante la aplicación de un parche o *Nozzle Pad*.

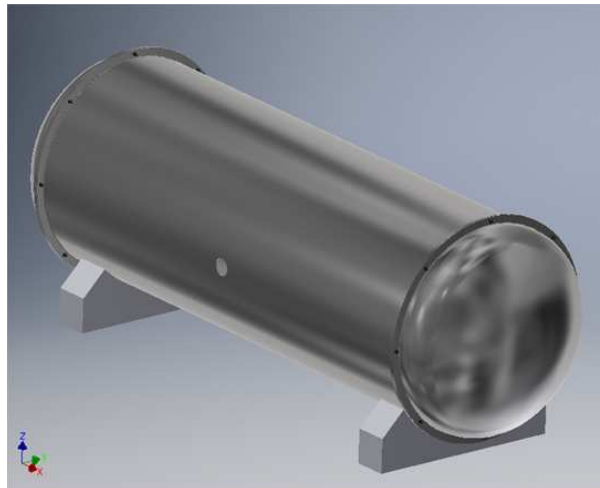


Figura 1: Vista general de la cámara hiperbárica apoyada en dos soportes ubicados en sus extremos.

### 3. MODELIZACIÓN NUMÉRICA

#### 3.1. Características de los modelos realizados en elementos finitos

Las simulaciones en elementos finitos se realizaron mediante la utilización del software [Inventor \(2020\)](#). El material de los modelos numéricos se definió con las siguientes propiedades mecánicas: Módulo de elasticidad longitudinal:  $E = 2 \times 10^5 MPa$  y Módulo de elasticidad transversal:  $G = 7,97 \times 10^4 MPa$ . En todas las simulaciones se realizaron 3 iteraciones con mayor refinamiento de malla en cada una de ellas, obteniéndose en todos los casos, una diferencia entre las tensiones máximas de las últimas dos iteraciones que no fuese mayor al 0,35 %. Las mallas de los respectivos modelos contienen entre 250 mil y 500 mil nodos y entre 150 mil y 300 mil elementos, dependiendo de las medidas del parche de refuerzo. La Figura 2, es una imagen de la región en que se practica el orificio, antes de aplicar el parche de refuerzo.

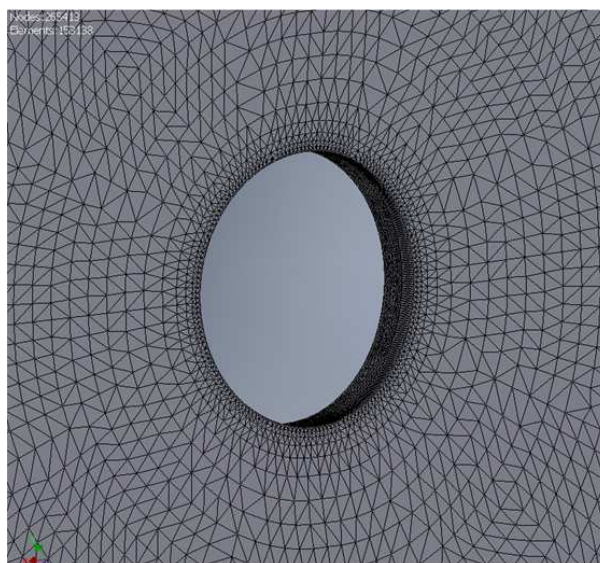


Figura 2: Mallado en la región del orificio, antes de colocar el parche de refuerzo.

### 3.2. Tensiones adyacentes al orificio practicado sin refuerzo

En la Figura 3, se muestra la distribución de tensiones de Von Mises, sobre la superficie externa de la cámara, en la zona adyacente al orificio practicado, antes de agregar el refuerzo.

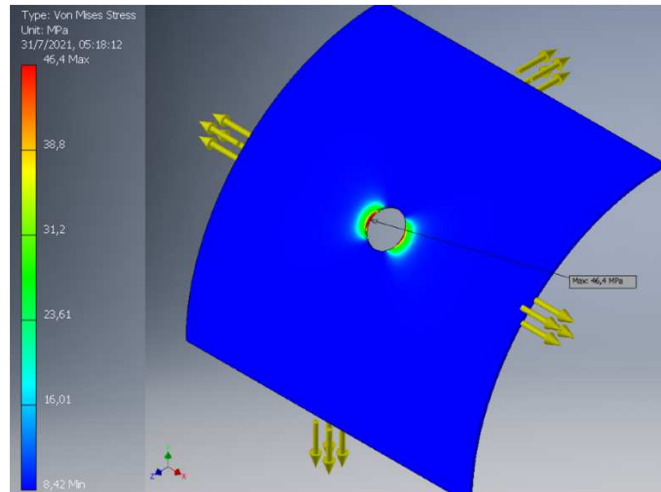


Figura 3: Tensiones de Von Mises en el sector adyacente al orificio, (sin refuerzo). Vista de superficie externa.

Se observa que la tensión máxima es de 46,4 MPa. En la Figura 4 se muestra el campo de tensiones correspondiente, visto desde el interior de la cámara.

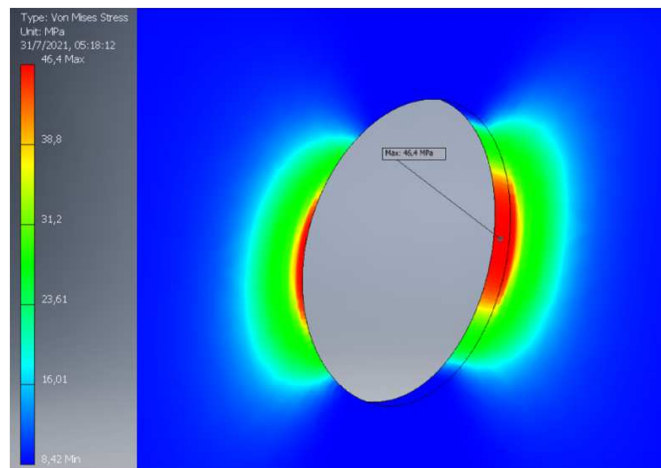


Figura 4: Tensiones de Von Mises en el sector adyacente al orificio, (sin refuerzo). Vista de superficie interna.

Se puede observar que, como producto de la concentración de tensiones, se alcanza una tensión máxima en el borde del orificio de 46,4 MPa. Como la tensión mínima de fluencia del material es de 235 MPa, la tensión admisible resulta igual al  $0,66 \times 235 = 151,1$  MPa. Puede considerarse entonces, que la tensión máxima alcanzada, es considerablemente menor a la admisible del material base. Sin embargo debido a la finalidad de uso de la cámara, resulta necesario y conveniente trabajar con un elevado margen de seguridad y en consecuencia se necesita emplear un parche de refuerzo que contemple el debilitamiento estructural provocado por la presencia del orificio.

### 3.3. Análisis de las propuestas de refuerzo mediante la colocación de un parche

A los efectos de compensar el debilitamiento estructural provocado por la presencia del orificio destinado a la ventanilla de observación, se consideran variantes de refuerzo de distintos espesores de chapa y de distinto diámetro exterior, manteniendo constante el área transversal aportada. Para conformar el parche de refuerzo, se utiliza una chapa de acero al carbono calidad IRAM F24, IRAM-IAS (2005), la cual se une a la cámara mediante soldadura eléctrica SMAW. El análisis de tensiones, obtenido con los modelos realizados en elementos finitos, permitirá adoptar la variante que resulte más conveniente, la cuál, posteriormente se verificará mediante la aplicación de las normas de aplicación específica.

### 3.4. Análisis del modelo en el que se adopta un parche de 15 mm de espesor

Espesor del refuerzo [mm]	Diámetro exterior del refuerzo [mm]	Tensión máx de Von Mises [MPa]
5	450	35,35
10	300	31,43
<b>15</b>	<b>250</b>	<b>29,32</b>
20	225	29,33
25	210	31,33
30	200	34,75

Tabla 1: Dimensiones de los parches de refuerzo y tensiones máximas de Von Mises. Diámetro interior = 150 mm. Área transversal del refuerzo = 1500 mm<sup>2</sup>.

Como puede observarse en la Tabla 1, el modelo en el que se alcanza el menor valor de la tensión de Von Mises, se logra mediante la aplicación de un parche de 15 mm de espesor, el cual tiene, un diámetro interior de 150 mm y un diámetro exterior de 250 mm, generando así un área transversal de compensación de 1.500 mm<sup>2</sup>, que es del mismo valor que el área transversal retirada. Como se comentó anteriormente, la unión rígida y estanca, entre el parche de refuerzo y la chapa del cilindro se garantiza mediante los cordones de soldadura, con la utilización del procedimiento de soldadura eléctrica.

La Figura 5, es una imagen parcial de la malla en elementos finitos, en la zona en que se aplica el parche de refuerzo.

En la Figura 6, se muestra la distribución de tensiones de Von Mises, en la zona del parche de 15 mm de espesor, vista desde el lado exterior de la cámara, mientras que en la Figura 7, se tiene la correspondiente vista desde la superficie interna.

Puede observarse en ambas figuras que, al analizarse el parche de refuerzo de 15 mm de espesor, el máximo valor de tensión de Von Mises, se reduce de 46,4 MPa a 29,32 MPa.



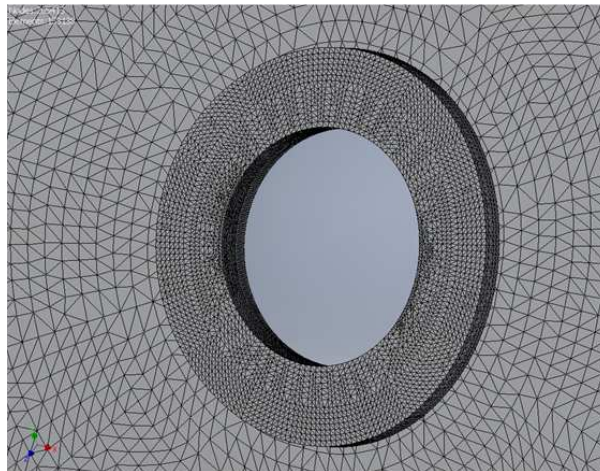


Figura 5: Mallado en la región del orificio, luego de colocar el parche de refuerzo.

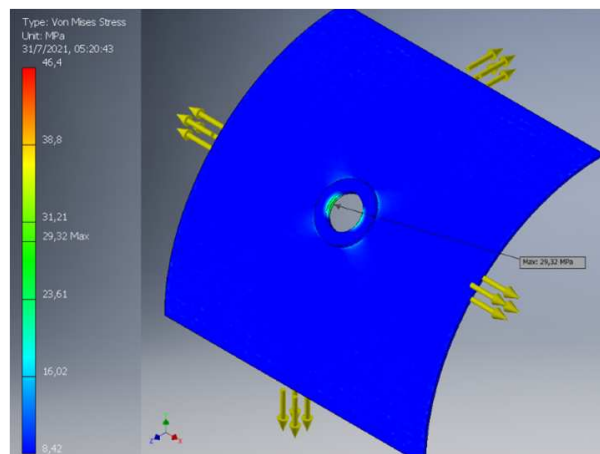


Figura 6: Tensiones de Von Mises en la región en que se encuentra el parche de 15 mm de espesor. Vista de la superficie externa.

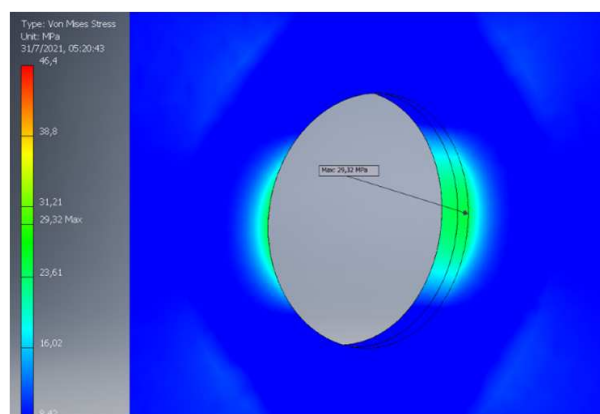


Figura 7: Tensiones de Von Mises en la región en que se encuentra el parche de 15 mm de espesor. Vista de la superficie interna

### 3.5. Análisis de las propuestas de refuerzo considerando el área mínima requerida

De la verificación estructural realizada mediante la normativa vigente, la cual se detalla en la próxima sección, surge que el área transversal mínima de compensación requerida, para definir las dimensiones del parche de refuerzo es de  $596,1 \text{ mm}^2$ , la cual se aproxima a  $600 \text{ mm}^2$ . Como se indicará más adelante, la misma se obtuvo a partir de la ec. (6).

Considerando ahora, el nuevo área transversal a compensar, se calculan nuevamente las dimensiones de los parches de refuerzo, mediante nuevas simulaciones numéricas. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.

Espesor del refuerzo [mm]	Diámetro exterior del refuerzo [mm]	Tensión máx de Von Mises [MPa]
2,5	390	40,46
5	270	37,96
<b>10</b>	<b>210</b>	<b>35,63</b>
15	190	37,56
20	180	42,98

Tabla 2: Dimensiones de parches de refuerzo y tensiones máximas de Von Mises. Diámetro interior =  $150 \text{ mm}$ . Área transversal del refuerzo =  $600 \text{ mm}^2$ .

De acuerdo a los resultados obtenidos, para el caso de adoptar un parche de refuerzo con un área de compensación de  $600 \text{ mm}^2$ , se observa que la solución más conveniente es la del parche de  $10 \text{ mm}$  de espesor y  $210 \text{ mm}$  de diámetro exterior.

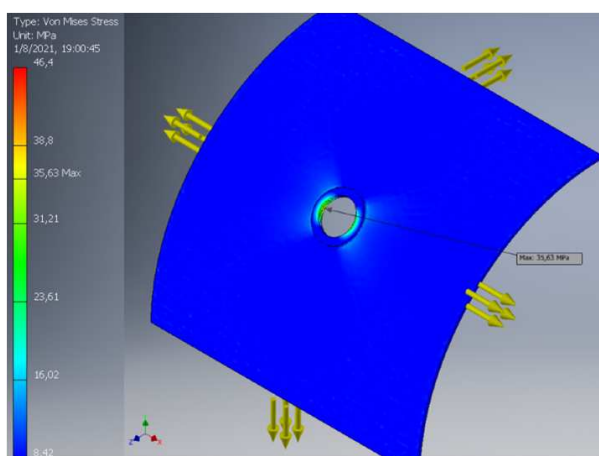


Figura 8: Tensiones de Von Mises en el sector adyacente al orificio, Con parche de refuerzo de  $10 \text{ mm}$  de espesor. Vista de superficie externa.

En la Figura 8 se muestra el campo de tensiones de Von Mises en la zona del parche de refuerzo obtenido con el análisis que se muestra en la Tabla 2, el cuál considera un área de

compensación de  $600 \text{ mm}^2$ . Puede observarse En este caso, que el máximo valor de tensión de Von Mises, en el modelo numérico, es de 35,63 MPa.

#### 4. VERIFICACIONES MEDIANTE EL USO DE LA NORMATIVA VIGENTE

Como se ha indicado en la introducción de este trabajo, la normativa aplicable a las cámaras hiperbáricas es la ASME PVHO-1, [ASME-PVHO-1 \(2016\)](#). La misma contiene todas las reglas y recomendaciones para el diseño, la fabricación e inspección de recipientes a presión para ocupación humana, como lo representan este tipo de equipos terapéuticos. En la parte 2.2.9.3 (Reinforcement of viewport flanges) del ASME PVHO-1, se indica que los refuerzos necesarios para las aperturas que se efectuaran en el cuerpo cilíndrico, deben analizarse y dimensionarse de acuerdo a las directivas del ASME VIII Div-1, [ASME-VIII-Div.1 \(2019\)](#).

##### 4.1. Determinación del espesor mínimo del cuerpo cilíndrico de la cámara

Para la determinación del espesor mínimo del cuerpo cilíndrico de la cámara hiperbárica de 1800 mm de diámetro exterior, se adopta lo indicado en el código ASME, Sección VIII, Div. 1, en su párrafo UG-27. Se considera que la presión de diseño  $P$  es de 0,4 MPa, es decir la de servicio más 0,2 MPa, como indica la norma de referencia.

La tensión de fluencia del acero utilizado para construir la cámara, es de 235 MPa, mientras que para la tensión admisible  $S$ , se adopta el 66 % de la tensión de fluencia del material, con lo cual se tiene:

$$S = 0,66 \times \sigma_f = 155,1 \text{ MPa} \quad (1)$$

Por otra parte, para la eficiencia de la soldadura se tiene:  $E = 1$ , por considerarse totalmente radiografiados los cordones de soldadura. Debe verificarse que la presión máxima de servicio  $P$  sea menor o igual a la presión máxima que permite la norma, la cual resulta:

$$P_{max} < 0,385 \times S \times E = 59,71 \text{ MPa} \quad (2)$$

En este caso la presión máxima de servicio calculada con la norma es de 59,71 MPa, un valor muy superior a la presión de diseño que es de 0,4 MPa, con lo cual, se satisface ampliamente la condición de diseño:

$$P <= P_{max} \quad (3)$$

El espesor mínimo requerido en el cuerpo cilíndrico,  $t_c$ , medido en mm, se determina mediante la siguiente expresión, establecida en el ASME VIII Div.1, [ASME-VIII-Div.1 \(2019\)](#):

$$t_c = \frac{P \times R}{S \times E - 0,6 \times P} = 2,324 \text{ mm} \quad (4)$$

Puede observarse que el requerimiento dado en la ec. (4) se satisface ampliamente, ya que  $t_c = 2,324 \text{ mm} \ll 0,5 R = 450 \text{ mm}$ . Al tratarse de un equipo de prolongada vida útil, se establece un margen de sobreespesor de material,  $C = 1,65 \text{ mm}$ , [Moss \(2004\)](#), para contemplar los efectos de la corrosión, con lo cuál, la norma establece en este caso, que el espesor mínimo requerido quedará determinado por:

$$t_r = t_c + C = \frac{P \times R}{S \times E - 0,6 \times P} + C = 3,974 \text{ mm} \quad (5)$$



con lo cual, el espesor mínimo requerido en el cuerpo cilíndrico, de acuerdo a la ec. (5), resulta de 3,974 mm. Debido a que el espesor de la chapa adoptado, del cuerpo cilíndrico de la cámara hiperbárica es de 10 mm, se verifica que el mismo es aproximadamente 2,5 veces el espesor mínimo necesario, comprobándose un margen de seguridad suficientemente amplio.

#### 4.2. Verificación del refuerzo adoptado

Para verificar si el espesor de la chapa de refuerzo, que ha sido determinado mediante la simulación numérica, es adecuado para resistir las tensiones máximas de servicio, se aplica el procedimiento establecido por la norma ASME-Sección VIII, Div.1, en su párrafo UG-37, ASME-VIII-Div.1 (2019), como si fuera el caso de una boquilla pasante, sin placa de refuerzo. Este procedimiento consiste en compensar el área de la sección transversal removida al practicar el orificio, con un refuerzo que agregue una sección transversal equivalente, o sea que tenga el mismo área transversal. Cabe aclarar que si bien no ingresará una boquilla en el interior del orificio, es el método que recomienda la norma para realizar este tipo de verificaciones.

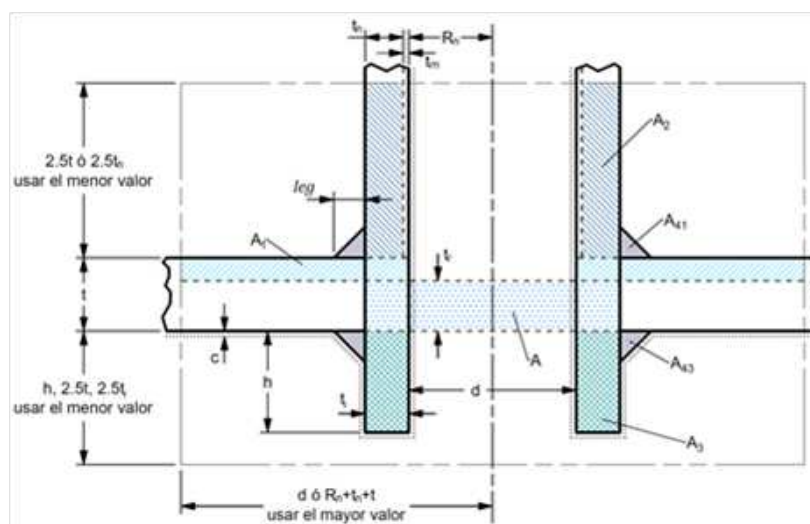


Figura 9: Imagen reproducida del UG-37, correspondiente a la norma ASME Sec. VIII-Div.1

Se definen los siguientes parámetros:

d: Diámetro final de la abertura circular en este caso = 150 mm.

F: Factor de corrección que compensa la variación de la tensión por presión interna en distintos planos con respecto al eje del recipiente. El valor de 1 debe usarse para las configuraciones contempladas en la Figura 9, excepto en casos de aberturas reforzadas en conos.

$t_r$ : Espesor mínimo requerido que ha sido determinado con la ec. (5).

Contemplando estas últimas consideraciones, se puede agregar que el área de la sección transversal total del refuerzo requerido en cualquier plano dado, a través de la abertura de un cuerpo cilíndrico sometido a presión interna, no debe ser menor que:

$$A = d \times t_r \times F = 150 \text{ mm} \times 3,974 \text{ mm} \times 1 = 596,1 \text{ mm}^2 \quad (6)$$

El procedimiento de soldadura de la chapa de refuerzo, como fue indicado anteriormente, debe realizarse por arco eléctrico protegido SMAW, satisfaciendo la norma AWS D1.1, AWS-D1.1. (2015).

## 5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Se realizó el análisis numérico, mediante elementos finitos y la posterior verificación, utilizando la normas vigentes, de un parche de refuerzo para compensar el debilitamiento estructural producido en una cámara hiperbárica, a la que se le practica un orificio, para colocarle una ventanilla de observación. En el primer análisis numérico, se consideró la compensación del área transversal removida, la cual es de 150 mm de diámetro, por 15 mm de espesor, totalizando un área de 1500 mm<sup>2</sup>. Del análisis por elementos finitos, surgió que el parche de refuerzo más conveniente es de 250 mm de diámetro exterior por 15 mm de espesor, reduciéndose la tensión máxima de Von Mises a 29,32 MPa.

Luego se realizó un segundo análisis numérico para determinar el parche más conveniente, considerando el espesor mínimo requerido, de 4 mm, en lugar del espesor real de la chapa, para determinar el área transversal de refuerzo. En este caso el parche de refuerzo más conveniente resultó ser de 210 mm de diámetro exterior por 10 mm de espesor, siendo la tensión máxima de Von Mises = 35,63 MPa. Puede observarse que con cualquiera de los dos criterios adoptados, los márgenes de seguridad, en relación a las tensiones máximas alcanzadas, son muy amplios ya que la tensión admisible de la chapa que conforma la cámara es de 155,1 MPa. La modelización numérica permitió confirmar, para este caso, los amplios márgenes de seguridad obtenidos al aplicar la normativa vigente.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al Departamento de Ingeniería y a la Secretaría General de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur (UNS), a la Comisión de Investigaciones Científicas-CIC de la Prov. de Buenos Aires, bajo cuyos auspicios se desarrolló el presente trabajo.

### REFERENCIAS

- ASME-PVHO-1. *Safety Standard For Pressure Vessels For Human Occupancy*. American Society Of Mechanical Engineers. N.Y., 2016.
- ASME-VIII-Div.1. *Pressure Vessels Code Design*. American Society of Mechanical Engineers. USA, 2019.
- AWS-D1.1. *Structural Welding Code Steel*. Welding Society. USA, 2015.
- Fontaine J. *Emploi chirurgical de l'air comprimé*, volumen 28. Union Medic. France, 1879.
- Inventor. *Software de diseño mecánico basado en elementos finitos Autodesk® Inventor*. AUTODESK, 2020.
- IRAM-IAS. *U500-503/12. Grado F-24*. Instituto de Racionalizacion Argentino de Materiales, 2005.
- Jones W., Brett K. and Han N., y Wyatt A. *Hyperbaric Physics*, volumen ID: NBK448104. Statpearls Publishing, USA, 2020.
- Lee S. *Henshaw, Nathaniel*, volumen 26. Dictionary of National Biography. London, 1891.
- Mauvecin G. y Espinosa C. *Safety Standard For Pressure Vessels For Human O*. Mar del Plata, 2011.
- Megyesy E. *Pressure Vessel Handbook*, volumen 20. LTC. USA, 2001.
- Moss D. *Pressure Vessel Design Manual*. Elsevier Science. USA, 2004.
- Raza Cheema M., Patel A., y Alam A. Analysis of pad reinforced opening in pressure vessels. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 8, 2019.