

ESTUDIO DE LA MODIFICACIÓN DE UN RECIPIENTE ESFÉRICO A PRESIÓN PARA ALOJAR UN MEDIDOR DE NIVEL INTERNO

STUDY OF THE MODIFICATION OF A SPHERICAL PRESSURE VESSEL TO ACCOMMODATE AN INTERNAL LEVEL METER

Cesar A. Lanz^a, Daniel H. Felix^a, Marcio W. Cantarelli^a y Diana V. Bambill^{a,b}

^aII-UNS, Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur (UNS)-CIC
Avda. Alem 1253, 8000 Bahía Blanca, Argentina, clanz@uns.edu.ar, dhfelix@uns.edu.ar,
<http://www.uns.edu.ar>

^bConsejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
Avda. Alem 1253, 8000 Bahía Blanca, Argentina, dbambill@criba.edu.ar, <http://www.uns.edu.ar>

Palabras clave: Integridad mecánica, Recipientes a presión, Industria Petroquímica.

Resumen. En este trabajo se analiza el efecto estático que produce una modificación estructural en una esfera de almacenaje de propano. Para instalar un instrumento de medición del nivel de gas licuado en el recipiente se necesita practicar un orificio en la pared de la calota superior. Se proponen tres variantes para robustecer la zona cercana al orificio, mantener la resistencia de la estructura original y garantizar la hermeticidad, asegurando así que el recipiente pueda permanecer en servicio durante los años de vida útil que aún le resten. Mediante modelos de análisis, basados en el método de elementos finitos, se obtienen las simulaciones numéricas correspondientes a las tres soluciones examinadas. Finalmente a través de un análisis comparativo de los modelos, se sugiere la forma considerada más conveniente para instalar el instrumental. También se analiza el diseño de los cordones de soldadura que unirán los elementos de fijación del instrumento.

Keywords: Mechanical integrity, pressure vessel, petrochemical industry

Abstract. The paper presents an analysis of the static effect produced by a structural modification in a spherical pressure vessel, which contains propane. It is necessary to make a hole in the wall of the upper shell to install an instrument for measuring the level of liquefied gas in the container. Three variants are proposed to reinforce the wall of the container around the hole, maintain the strength of the original structure and guarantee airtightness. In this way the modified pressure vessel may continue in service during the remaining years of useful life. By means of models, based on the finite element method, the numerical simulations corresponding to the three solutions examined are obtained. Finally, through a comparative analysis of the models, the most convenient way to install the instruments is suggested. The design of the welding cords that will join the fastening elements of the instrument is also analyzed.

1 INTRODUCCIÓN

En Argentina, durante la década de los 80, se han instalado en plantas de almacenaje y despacho de gases líquidos y otros derivados del petróleo, varios recipientes a presión esféricos (esferas de almacenaje) BPVC ASME VIII Div.1. En los mismos se disponía la aplicación de dispositivos electromecánicos para la medición del nivel interior. Dichos dispositivos, resultan actualmente obsoletos e incompatibles con los softwares de control de proceso y fundamentalmente con los programas que AFIP (Administración Federal de Ingresos Públicos) utiliza para la facturación de los impuestos nacionales. Por lo tanto se hizo necesario reemplazar estos dispositivos de medición de nivel, por un moderno sistema de medición on-line, que entrega los datos del volumen procesado y los relaciona con el software de facturación de impuestos mencionado.

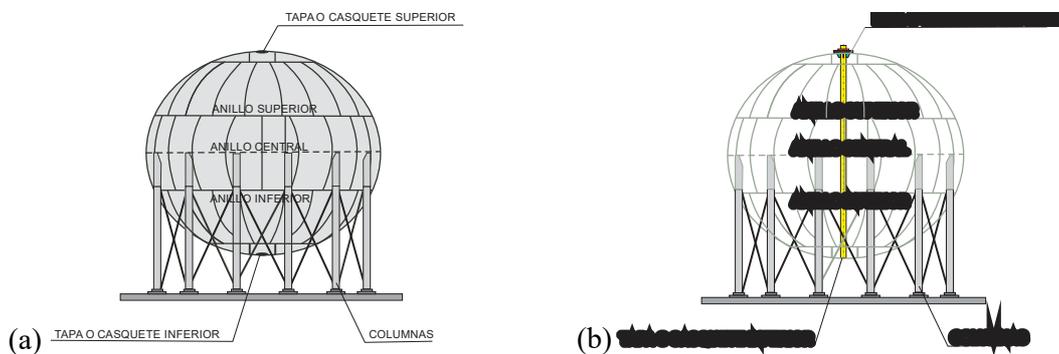


Figura 1: (a) Recipiente a presión esférico. (b) Vista estructural con el instrumento de medición.

La Figura 1, (Lanz y Felix, 2016) muestra el esquema del recipiente esférico sometido a presión de 18,9 m de diámetro, al cual debe añadirse un sistema de medición del nivel interior, Figura 1 (b). La modificación consiste en practicar un orificio en su parte superior, denominada “calota superior” para ubicar el instrumento de medición. La chapa de la esfera de 42 mm de espesor responde a la norma ASTM A516 Gr. C. En dicho orificio se instalará un cuello o “Nozzle”, fabricado con un material que responde a la norma ASTM A53 Gr. B y una brida para acoplar el dispositivo de medición BPVC ASME II. Part. A. El sistema de medición tiene un peso total de 15696 N. Se colocará una brida de 20 pulgadas Serie 300 WN, la cual estará vinculada con el cuello antes mencionado al recipiente esférico.

La modificación debe garantizar la estanqueidad y la resistencia estructural que requiere un recipiente a presión, (ver Figura 2). Surge entonces la necesidad de reforzar los bordes del orificio practicado, mediante un parche (*Nozzle Pad*). En este trabajo se analizarán tres variantes posibles de refuerzo, empleando un acero calidad ASTM A36 para buscar la variante que sea considerada como la más conveniente. La vinculación rígida y estanca entre el parche, la chapa de la esfera y la brida se garantiza mediante cordones de soldadura. Los mismos se obtendrán mediante el empleo del procedimiento de soldadura eléctrica de arco revestido, (SMAW su sigla en inglés) AWS D1.1.

Para el análisis propuesto se han tenido en cuenta varias referencias bibliográficas. Entre ellas se puede destacar el trabajo de (Adeyefa and Oluwole, 2013). Ellos emplearon el método de elementos finitos para determinar el espesor del cuerpo de una esfera utilizada para el almacenaje de gas natural licuado. En sus conclusiones, señalaron que los espesores obtenidos mediante la simulación numérica de la misma, diferían en menos de un 5% de los valores obtenidos por aplicación estricta de la parte UG del código ASME VIII Div.1.

(Liu et al. 2001) presentan una evaluación de la integridad estructural del conjunto esfera-cuello, mediante la determinación de los valores característicos de las tensiones y deformaciones, debida entre otras causas a la presión interna del recipiente. En el trabajo hay una optimización de la forma adoptada para la unión entre cuello y recipiente esférico bajo presión interna, empleando un método llamado desarrollo metamórfico. La optimización elimina los picos de tensiones producidos por la presencia del orificio practicado para alojar el cuello en la esfera.

Los autores (Schindler and Zeman, 2003), mediante una simulación con elementos finitos, realizaron un estudio comparativo de los factores de concentración de tensiones en la unión entre el cuello y el recipiente. Esos valores fueron contrastados con los indicados por el código Británico de construcción de recipientes a presión con uniones soldadas BS5500-1997. Como resultado de la comparación, los autores informan un buen acuerdo entre la simulación por elementos finitos y los indicados por el código.

El efecto reforzador que presentan los cordones de soldadura entre el cuello y recipiente fue estudiado por (Dekker and Brink, 2000). Ellos indican que el agregado del material de aporte en el cordón de soldadura ofrece solo un pequeño efecto de refuerzo en la unión. Los autores resolvieron un modelo de elementos finitos 3D, axil simétrico y concluyeron en que el agregado del material del cordón de soldadura tiene una influencia menor al 10% de aumento de resistencia ante la presencia de la máxima presión admisible interna. El código Alemán de recipientes a presión, al que Dekker y Brink hacen referencia, sugiere factores para los espesores de las partes a unir del orden de 1.6.

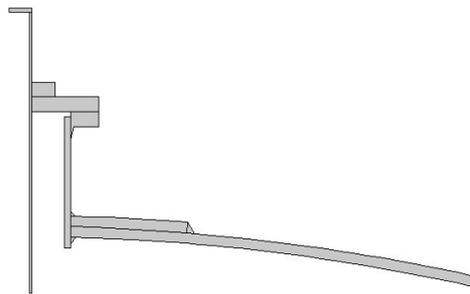


Figura 2: Detalle esquemático de la modificación incorporada a la esfera.

En la Figura 2 se pueden observar los detalles esquemáticos de la modificación propuesta para instalar el dispositivo de medición. Se muestra un corte axil-simétrico de: la parte superior del recipiente esférico, el caño que aloja al medidor de nivel, la brida, el parche, la contra brida del dispositivo y los cordones de soldadura.

2 MATERIALES Y METODOLOGÍAS UTILIZADOS

2.1 Brida de montaje del sistema de medición de nivel

La modificación del recipiente a presión se muestra en la Figura 2. Se trata de una brida de cuello soldable de 20 pulgadas del tipo WN RF Serie 300 (diámetro exterior DE 775mm), que responde a la norma ANSI B16.47. La misma está fabricada en acero al carbono ASTM A105. Su espesor máximo es de 140 mm y el diámetro entre ejes de agujeros que permiten el pasaje de los bulones de fijación es de 685.8 mm. El acero satisface BPVC ASME II. Part. A., el cual posee una tensión de rotura de 485 MPa (según es informado por los fabricantes). Se muestran

en la [Tabla 1](#), la composición química de los materiales de la brida, el cuello y el refuerzo, según son informados por BPVC ASME II. Part. A.

Elemento	Composición % (Máx.)		
	ASTM A105	ASTM A53 Gr.B	ASTM A36
Carbono	0.35	0.30	0.26
Manganeso	1.05	1.20	1.20
Fósforo	0.035	0.05	0.04
Azufre	0.040	0.045	0.05
Silicio	0.35	0.00	0.40
Cobre	0.40	0.40	0.40
Nickel	0.40	0.40	0.00
Cromo	0.30	0.40	0.00
Molibdeno	0.12	0.15	0.00
Vanadio	0.05	0.08	0.00
Wolframio	0.02	0.00	0.00

Tabla 1: Composición química de los materiales utilizados.

2.2 Características y material del cuello o “Nozzle”

El cuello que se contempla (Ver [Figura 2](#)) está conformado por un tubo de acero sin costura Schedule 80, que responde a la norma ANSI B36.10BBE, fabricado con un acero según norma ASTM A53 Gr.B. Dicho tubo posee un diámetro exterior de 508 mm, espesor nominal de pared de 26 mm y una longitud de 350 mm. El material del cuello posee una tensión de rotura de 415 MPa. La composición química del ASTM A53Gr.B, se muestra en la [Tabla 1](#).

2.3 Descripción de los parches (*Nozzle Pad*) de refuerzo

Las distintas variantes de los parches (*Pads*) se proponen en acero de calidad ASTM A36, dicho material posee una tensión de rotura de 435 MPa. La composición química del ASTM A36 se muestra en la [Tabla 1](#).

Las características geométricas pueden observarse en la [Tabla 2](#) y la disposición en la [Figura 2](#).

	Variante a	Variante b	Variante c
Diámetro Interior [mm]	508	508	508
Diámetro Exterior [mm]	1010	1360	1630
Espesor del parche [mm]	42	25	19

Tabla 2: Geometría de los distintos parches analizados.

3 DISEÑO Y VERIFICACIÓN DE LAS MODIFICACIONES IMPLEMENTADAS

3.1 Verificación del espesor mínimo del cuello

El espesor mínimo t_r requerido en el cuello es de 6.36 mm y fue determinado con la

expresión:

$$t_r = \frac{P \times R}{S \times E - 0.6 \times P} \quad (1)$$

donde R es el radio exterior del cuello de 254 mm, P es la presión de diseño, de 2 MPa, S la tensión admisible, de 160 MPa y E la eficiencia del cordón de soldadura, de valor 1 por ser un tubo sin costura, según BPVC ASME VIII Div.1. Se adopta un espesor de tubo de 26 mm correspondiente a un Schedule 80 XS, debido a que la norma establece solo la verificación del espesor considerando la presión interior del cuello y no considera el efecto del esfuerzo de la chapa de la esfera. Por ello el espesor disponible de 26 mm es superior al requerido (mínimo) por este criterio.

3.2 Diseño de las tres variantes del parche de refuerzo

El procedimiento de realizar en la calota superior de la esfera un orificio de 508 mm de diámetro para instalar el cuello, provoca un debilitamiento local de la misma, producto del efecto de la concentración de tensiones y la ausencia del material que le otorgaba continuidad. Resulta necesario entonces, reforzar localmente la zona que ha sido debilitada por el orificio, para lo cual se aplica un parche de refuerzo (ver [Figura 3](#)). Dicho refuerzo, se fija al cuello y a la chapa de la esfera mediante cordones de soldadura realizados por el procedimiento de arco eléctrico revestido SMAW. ([Farr y Maan, 2001](#)), recomiendan que el material retirado de la esfera al practicar el orificio, sea repuesto con una cantidad igual de material en el parche de refuerzo. La cantidad de material retirado en la sección transversal de la esfera es de 21336 mm² (508mm de diámetro del cuello x 42 mm de espesor de la chapa de la esfera). Se compensa entonces el material retirado de la esfera mediante tres variantes geométricas de un aro de acero calidad ASTM A36, que tiene un diámetro interior de 508 mm, tres valores distintos de diámetro exterior y tres valores distintos de espesor, ver [Tabla 2](#).

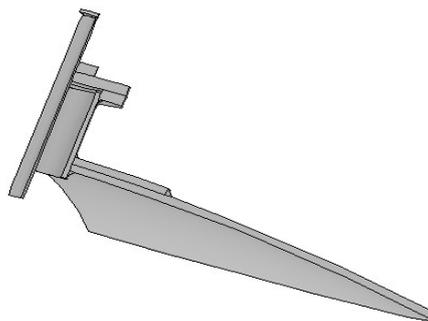


Figura 3: Vista de un sector del parche de refuerzo sobre esfera.

4 RESULTADOS DE LA SIMULACION POR FEM EMPLEANDO COMSOL.

Los cálculos fueron realizados utilizando el software de elementos finitos ([COMSOL Multiphysics, versión 4.4, 2013](#)).

4.1 Variante a, campo de tensiones de Von Mises con el parche de 42 mm de espesor.

En la [Figura 4](#) se observa el campo de tensiones en MPa en los componentes de la modificación que emplea un parche de 42 mm de espesor.

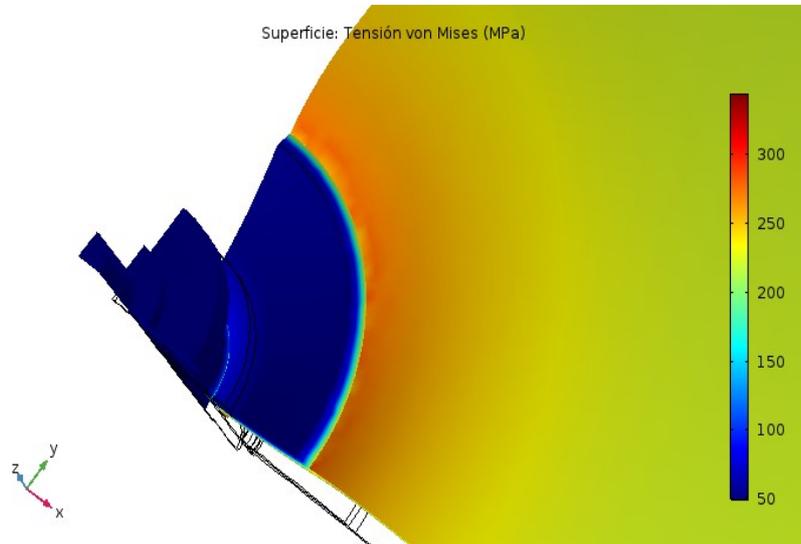


Figura 4: Vista de un sector del parche de refuerzo sobre esfera y cuello, variante a.

4.2 Variante b, campo de tensiones de Von Mises con el parche de 25 mm de espesor.

En la [Figura 5](#) se observa el campo de tensiones en MPa en los componentes de la modificación que emplea un parche de 25 mm de espesor.

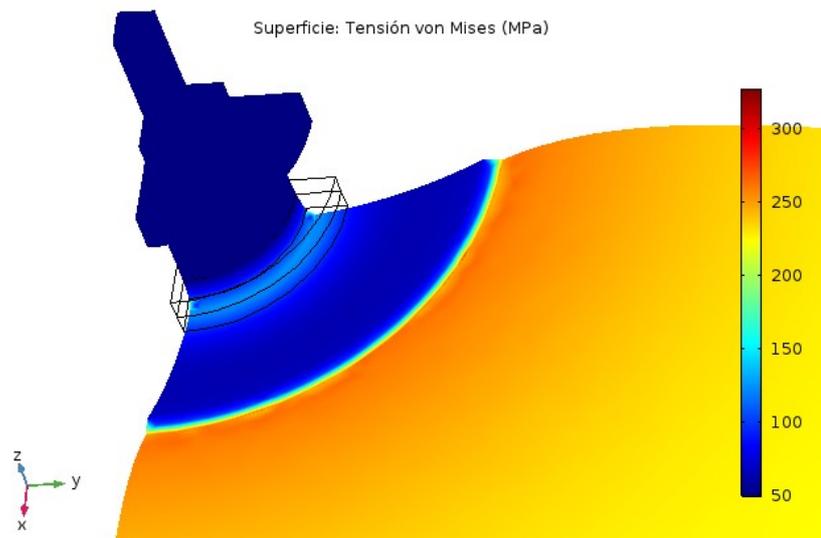


Figura 5: Vista de un sector del parche de refuerzo sobre esfera y cuello, variante b.

4.3 Variante c, campo de tensiones de Von Mises con el parche de 19 mm de espesor.

En la [Figura 6](#) se observa el campo de tensiones en MPa en los componentes de la

modificación que emplea un parche de 19 mm de espesor.

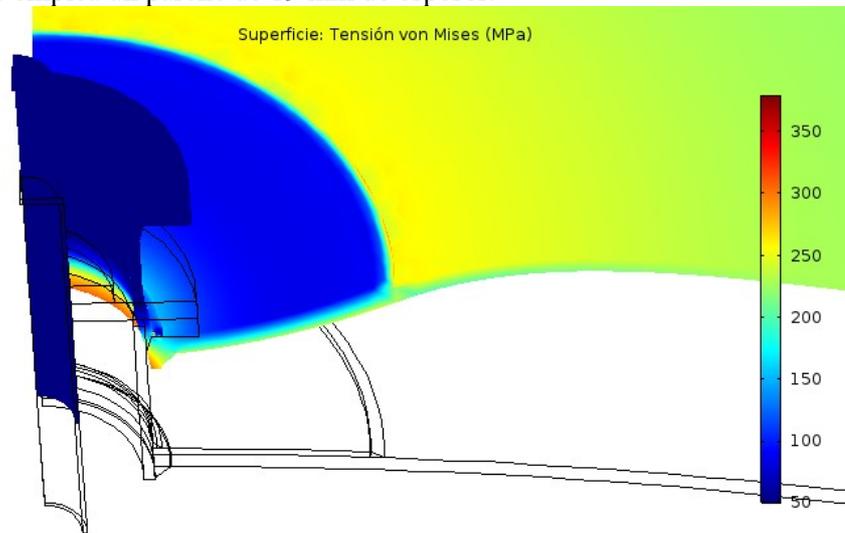


Figura 6: Vista de un sector del parche de refuerzo sobre esfera y cuello, variante c.

Analizados los tres modelos de parches, se observa que la variante de diseño del parche de compensación que emplea una chapa de 19 mm de espesor (variante c), resulta ser la opción más adecuada. En dicha variante fue posible obtener la menor concentración de tensiones en la zona de unión entre la chapa de la esfera y el parche de compensación.

5 VERIFICACION DE LOS CORDONES DE SOLDADURA.

La verificación de la aptitud de los cordones de soldadura en la variante adoptada, se consigue aplicando el procedimiento recomendado en (Mott, 2006). En el mismo se considera al cordón de soldadura como una línea. Como material de aporte se consideró el empleo de una varilla de 4 mm del electrodo de la característica E 7018-1.

5.1 Soldadura entre chapa de esfera y cuello.

En la Figura 7 se observa el cordón de soldadura con el que se vincula la chapa de la esfera con el cuello. Se trata de un cordón a tope con un cateto de 19 mm, un perímetro medio total de 1626 mm y una sección resistente al corte puro de 30894 mm².

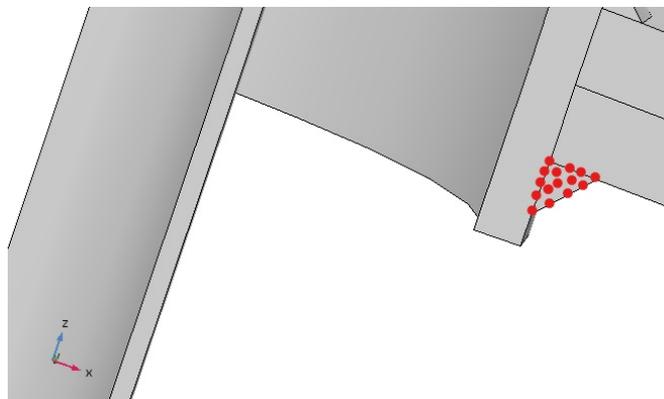


Figura 7: Cordón de soldadura que vincula chapa y cuello.

Se considera que este cordón soporta el 50% de los 15696 N del instrumento de medición de nivel y que el resto lo soporta el cordón de soldadura que vincula el *pad Nozzle* con el cuello. Mediante la carga asignada al cordón y su sección resistente se obtuvo que la tensión media en el cordón es de 254 MPa. Considerando que la norma AWS A 5.1 para el electrodo E 7018-1 le asigna una tensión límite en el punto de fluencia de 393 MPa, se observa que el presente cordón de soldadura está sometido a un esfuerzo inferior al límite establecido por la norma mencionada y por lo tanto está asegurada su aptitud.

5.2 Soldadura entre chapa de esfera y *pad Nozzle* o refuerzo

En la [Figura 8](#) se observa el cordón de soldadura con el que se vincula la chapa de la esfera y el parche de refuerzo, se trata de un cordón a tope con un cateto de 19 mm y un perímetro medio de 2636 mm.

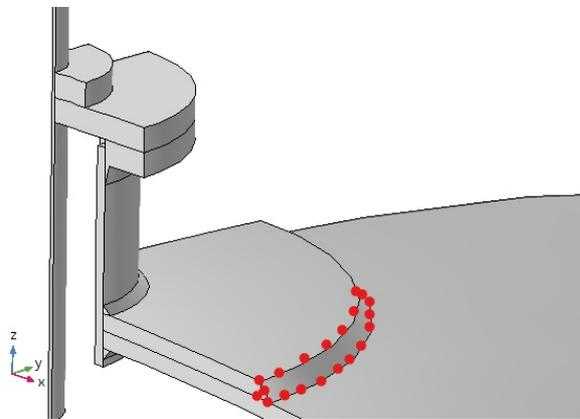


Figura 8: Cordón de soldadura que vincula chapa de refuerzo.

La tensión en la chapa de la esfera en la zona del cordón, como puede observarse en la [Figura 6](#), es de 125 MPa. En consecuencia la tensión de corte (50 % de la tensión en la chapa) es de 62.5 MPa. (Mott, 2006) informa en la tabla 20-3 (Pág.785) que la capacidad portante del cordón del E 7018-1 que se realiza con un cateto de 19 mm, es de 1.02 MN/m de longitud de cordón y una tensión admisible al corte de 101.4 MPa. Considerando la capacidad informada por Mott y la tensión calculada de corte, de 62.5 MPa, se infiere que la capacidad portante del mismo será la suficiente, para vincular rígidamente el parche y la chapa de la esfera.

5.3 Soldadura entre *pad Nozzle* y cuello.

En la [Figura 9](#) se observa el cordón de soldadura con el que se vincula el cuello con la chapa de refuerzo, se trata de un cordón a tope con un cateto de 19 mm, un perímetro medio total de 1626 mm y la sección resistente al corte puro de 30894 mm².

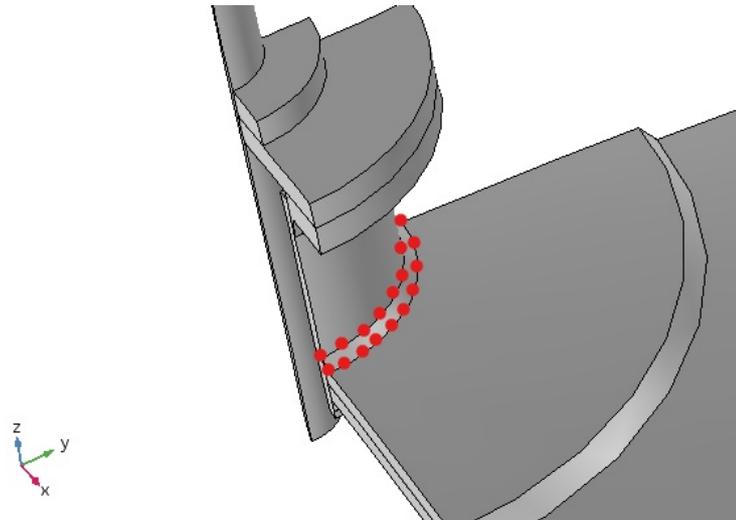


Figura 9: Cordón de soldadura que vincula chapa refuerzo y cuello.

Se considera que este cordón soporta el 50% de los 15696 N del instrumento de medición de nivel, el resto lo soporta el cordón de soldadura que vincula la chapa de la esfera con el cuello, analizada previamente. La tensión media en el cordón es de 254 MPa. Considerando que la norma AWS A 5.1 para el electrodo E 7018-1 asigna una tensión límite en el punto de fluencia de 393 MPa, se infiere nuevamente que el presente cordón tiene un esfuerzo inferior al límite establecido y por lo tanto está asegurada su aptitud.

6 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

Luego de haber analizado los tres modelos del diseño de los parches de refuerzo, se observa que en la variante c, tanto en el parche propiamente dicho como en la chapa de la esfera en inmediaciones del mismo, el campo de tensiones alcanza los valores menores. El estudio realizado muestra que el menor coeficiente de concentración de tensiones en el cuello se obtiene con la variante c. Del estudio de la configuración adoptada para los cordones de soldadura se concluye que los mismos son adecuados para lograr la fortaleza y la estanqueidad necesaria. Se concluye entonces que es más conveniente emplear para el parche, un espesor de chapa menor, abarcando una zona reforzada mayor, situación que le confiere un menor grado de rigidez a la zona estudiada.

AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo ha sido desarrollado en el Departamento de Ingeniería y en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur. Fue patrocinado por la Universidad Nacional del Sur (UNS), el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC).

REFERENCIAS

- Adeyefa, O., y Oluwole, O., Finite Element Modeling of Variable Membrane Thickness Field Fabricated Spherical (LNG) Pressure Vessels. *Engineering*, 5:469-474, 2013.
 AWS A5.1, *Specification for carbon steel electrodes for shielded metal arc welding*, 2010.
 AWS D1.1, *Structural Welding Code*, 2010.
 BPVC ASME II. Part. A., *Ferrous Material Specifications*, 2013.

- BPVC ASME VIII Div.1, *Rules for Construction of Pressure Vessels*, 2017.
- COMSOL Multiphysics, versión 4.4, 2013.
- Dekker, C.J., and Brink, H.J., Nozzles on spheres with outward weld area under internal pressure analysed by FEM and thin shell theory. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 77: 399-415, 2000.
- Faar, J.R. y Maan, H.J. *Guidebook for design of ASME BPVC Sec. VIII . Pressure Vessels*. 2° Edición New York. p.291, 2001.
- Lanz, C.A. y Felix D.H., Diseño de un recipiente a presión esférico modificado por instalación de un tubo guía. *III CADI-IX CAEDI 2016*, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Noroeste, Chaco, Argentina, 2016.
- Liu, J.S., Parks, G.T., y Clarkson, P.J, Shape Optimization of axisymmetric cylindrical nozzles in spherical pressure vessels subject to stress constrains. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 78: 1-9, 2001.
- Mott, R.L., *Design Machine Elements*, 4°Edición, Editorial Pearson, 2006.
- Schindler, S., y Zeman, J.L., Stress concentration factors of nozzle-sphere connections. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 80: 87-95, 2003.