

EVALUACION DE APTITUD PARA EL SERVICIO MEDIANTE MODELADO ELASTOPLASTICO POR ELEMENTOS FINITOS

Hernán Kunert ^{a,e}, José Luis Otegui ^d, Sergio Padula^c, Felix Ojeda^c, Esteban Rubertis ^{b,e}

^aGIE S.A.-Área Análisis de Falla

^bGIE S.A.-Área Integridad de Plantas Industriales

^cTOTAL AUSTRAL S.A.

^dDivisión Soldadura y Fractomecánica ñ INTEMA ñ Universidad Nacional de Mar del Plata

^eDepartamento de Ingeniería Mecánica ñ Universidad Nacional de Mar del Plata

e-mail: kunert@giemdp.com.ar

Palabras clave: API 579, FFS, laminación, nivel 3, FEM, modelado.

Resumen. Este trabajo presenta los resultados de la Evaluación de Aptitud para el Servicio (FFS) de un Separador (Scrubber), operativo en un yacimiento de Argentina desde mediados de 2003. Se detectaron y caracterizaron discontinuidades definidas como laminaciones debidas al proceso de fabricación del material. Las soldaduras, si bien son adyacentes a la zona laminada, no presentan discontinuidades. Se uso el Nivel 3 de la nueva edición de la API STD 579 ASME FFS-1 (Junio 2007) para evaluar la zona laminada de mayor dimensión, cuya evaluación Nivel 1 y 2 resultaba no apta para el servicio. La condición de inacceptabilidad de las laminaciones es la proximidad a las discontinuidades estructurales mayores (soldaduras y acometida), ya que en las zonas cercanas a estas discontinuidades pueden existir tensiones locales de flexión que pueden actuar sobre las laminaciones existentes. Se describe en detalle el modelo implementado, los criterios adoptados, los resultados obtenidos y las recomendaciones presentadas al propietario para mantener el recipiente en condiciones seguras de operación de acuerdo a la norma mencionada

1 INTRODUCCIÓN

La determinación de la aptitud para el servicio es una tecnología que comprende el establecimiento de la probabilidad de fallas y eventuales medidas correctivas a ejecutar, mediante el análisis de los posibles mecanismos de daño actuantes a lo largo del tiempo en cada equipo. Esta tecnología es el resultado de la aplicación de técnicas y procedimientos multidisciplinarios que permiten establecer la situación o estado en que se encuentra un equipo, con la finalidad de prever su comportamiento futuro e indicar sus necesidades de inspección, monitoreo, recuperación, refuerzo y/o reparación [1].

La norma **API STD 579 / ASME FFS-1 (Edición 2007)** ó *Fitness-for-Service* fue concebida como una norma que permite demostrar la integridad estructural de un componente sometido a presión que contenga un daño o defecto original o producido durante el servicio [2]. La aplicación de la misma implica la utilización de las herramientas más modernas que dispone la industria para la evaluación de la integridad estructural de sus componentes [3,4,5]. En la actualidad este campo de investigación esta en constante evolución [6] debido a la creciente demanda por parte de diferentes industrias.

En la **Figura 1** se observa una vista general del recipiente, el mismo fue diseñado bajo ASME Sección VIII Div.1 Ed 2001 para una presión máxima admisible de trabajo (MAWP) de 63,50 Bar g a 65°C y radiografiado RT-1. También cuenta con alivio de tensiones. El equipo entró en servicio a mediados de 2003, tiene un espesor nominal de pared de 76,2mm en acero SA-516 Gr. 70 N y sus dimensiones aproximadas alcanzan los 4.5m de altura y 3m de diámetro.

A partir de los resultados de una inspección de rutina se detectó durante la medición de espesores la presencia de laminaciones en la envoltente del separador. Este evento motivó la evaluación de las discontinuidades detectadas.

Un inspector nivelado de GIE realizó mediciones de espesor desde el exterior con un equipo KRAUTKRAMER DMS2, con palpadores normales, esto permitió detectar la presencia de laminaciones, su dimensionado y su ubicación en el recipiente. La mayoría de estas tenían dimensiones promedio de 30mm de diámetro y se presentaban dispersas, sin patrón aparente sobre la mitad del espesor.



Figura 1: Separador estudiado

Particularmente en una de las chapas de la envolvente se detectó una laminación de grandes dimensiones (2220 x 1300 mm), tal como se puede observar en la **Figura 2** (coloreado fotográficamente en azul). En rigor, ensayos posteriores con palpadores de distintas frecuencias (sensibilidades) demostraron que la gran zona laminada era una superposición de pequeñas óhojuelasô o óámpollasô alineadas en el centro del espesor que conformaban la zona laminada no continua. En la **Figura 3** se muestra como parte de la zona laminada se encuentra atravesada por un niple de conexión y un soporte, que actualmente se encuentra sin uso. Además cabe destacar que en algunos sitios de esta discontinuidad se presentan zonas ófundidasô, es decir donde el espesor no está laminado, como se observa en la Figura 2.



Figura 2: Extensión de la zona laminada

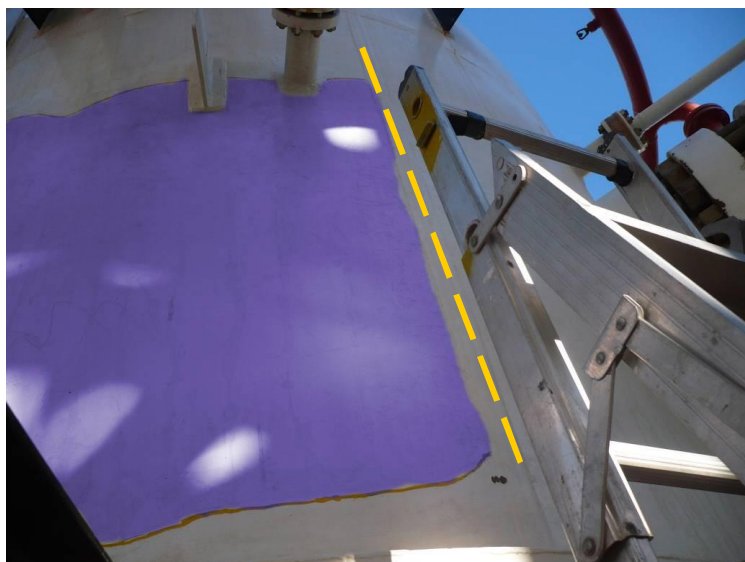


Figura 3: Niple, soporte y soldadura en zona laminada

Para verificar el ángulo y los bordes de las laminaciones se hicieron mediciones por medio de un equipo KRAUTKRAMER UNS 52 L, con palpadores angulares y patrones de calibración K1 y K2. Se verificó que no existen componentes angulares en los bordes de las laminaciones. Se realizó además la detección de fallas en las soldaduras longitudinales en donde limitan las laminaciones (línea amarilla en Figura 3). La presencia de laminaciones en la zona de la soldadura es particularmente crítica ya que cualquier tipo de discontinuidad en la misma puede resultar en una propagación de la laminación hacia la superficie produciendo la falla del recipiente. No se detectaron discontinuidades relevantes en las soldaduras ensayadas.

2 EVALUACION DE LA APTITUD PARA EL SERVICIO, NIVELES 1 Y 2.

Con el objeto de determinar la aptitud para el servicio del recipiente, se realizó una evaluación de las discontinuidades por medio de la nueva edición de la **API STD 579 ASME FFS-1 (Junio 2007)**, en particular, esta normativa, en la Parte 13 óAssessment of Laminations describe los pasos a seguir para la evaluación de aptitud para el servicio de un componente con presencia de laminaciones, la cual describe: óLas laminaciones son detectadas usualmente durante la inspección por ultrasonido. Las laminaciones afectan las soldaduras, interfieren con los exámenes de ultrasonido de soldaduras y reducen la resistencia de la placa cuando la misma está sometida a esfuerzos de flexión, compresión, o a tensiones en el espesor. Las laminaciones pueden resultar no objetables si son paralelas a la superficie de la placa, el componente está sometido a tensiones de membrana debido a presión interna, y las laminaciones se encuentran fuera de las zonas con tensiones de flexión local debidas a discontinuidades estructuralesö[7].

La evaluación de la laminación mayor por medio de API 579, determinó que la misma no resulta apta para el servicio por el Nivel 1 y 2. El problema radica principalmente en dos cuestiones:

- 1) La laminación se encuentra limitada por las soldaduras longitudinales, problema no objetable en el Nivel 2, dado que se verificó que no existen fisuras que atraviesan el espesor.
- 2) La proximidad de los bordes de la laminación sobre las discontinuidades estructurales mayores (acometidas de 20 y 24, soportes, etc) que pueden inducir estados tensionales complejos.

Se puede resumir que la condición de inaceptabilidad de las laminaciones observadas es la proximidad a las discontinuidades estructurales mayores. En las zonas cercanas a estas discontinuidades pueden existir tensiones locales de flexión que pueden actuar sobre las

laminaciones existentes. Las opciones recomendadas por API 579 son: reparar, reemplazar o realizar un Nivel 3. Por tal motivo se realizó un Nivel 3 de API 579 Parte 13, para verificar mediante un modelado numérico si las tensiones locales de flexión, compresión, etc. debidas a cargas de piping, soportes y otras afectan la laminación existente.

3 EVALUACION DE LA APTITUD PARA EL SERVICIO, NIVEL 3.

3.1 MODELADO NUMÉRICO

Se realizó un modelo elastoplástico (utilizando la teoría de plasticidad de Von Mises). Se utilizó una versión comercial del software Abaqus [8]. El objetivo fue modelar los casos de combinaciones de carga indicados por el apéndice B de la norma API STD 579 - ASME FFS-1 (Junio 2007). A continuación se presenta el desarrollo del modelo de elementos finitos y una visión detallada de los resultados.

Se generó la geometría del separador, **Figura 4**. Se modelaron únicamente las acometidas de entrada - salida y la boca de inspección (todas de 24") y el niple de 2" pulgadas que sostiene un instrumento y se ubica en inmediaciones de la zona laminada. El resto de los niples fueron descartados del modelo. Se modeló explícitamente la laminación por medio de interacciones de contacto entre sendos lados de la zona laminada. Se realizó una malla de mas de 14000 elementos tipo tetraedros lineales para todo el recipiente (excepto para la zona laminada). Dos piezas de 155 y 147 elementos tipo hexaedros lineales representan la zona laminada. Se realizó una verificación de buen condicionamiento de la malla en varios aspectos fundamentales dando resultados satisfactorios.

Como se observa en la Figura 4, el recipiente no presenta condiciones de simetría. Se ubicó una restricción de los desplazamientos verticales (eje o_y) en la soldadura de la pollera (Figura 4). Adicionalmente se restringieron las dos direcciones (ejes o_x y o_z) en el punto central del casquete inferior. No se impusieron restricciones del tipo rotacional debido a que la formulación de los elementos utilizados (tipo sólido) no soporta dichos grados de libertad. En cuanto a las combinaciones de casos de carga que incorporan deformaciones térmicas se consideró temperatura inicial de 21°C y temperatura de operación de 32°C.

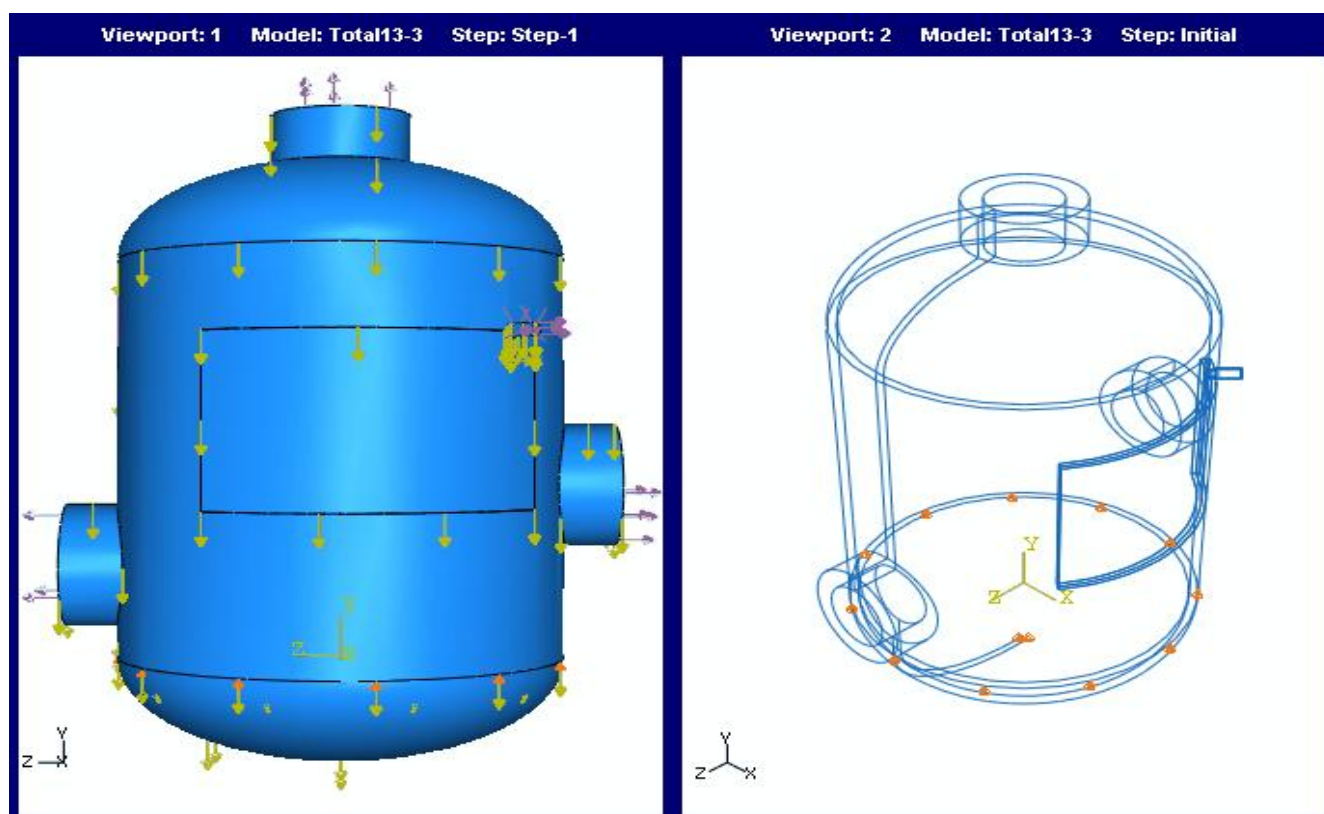


Figura 4: Geometría modelada y sus condiciones de borde

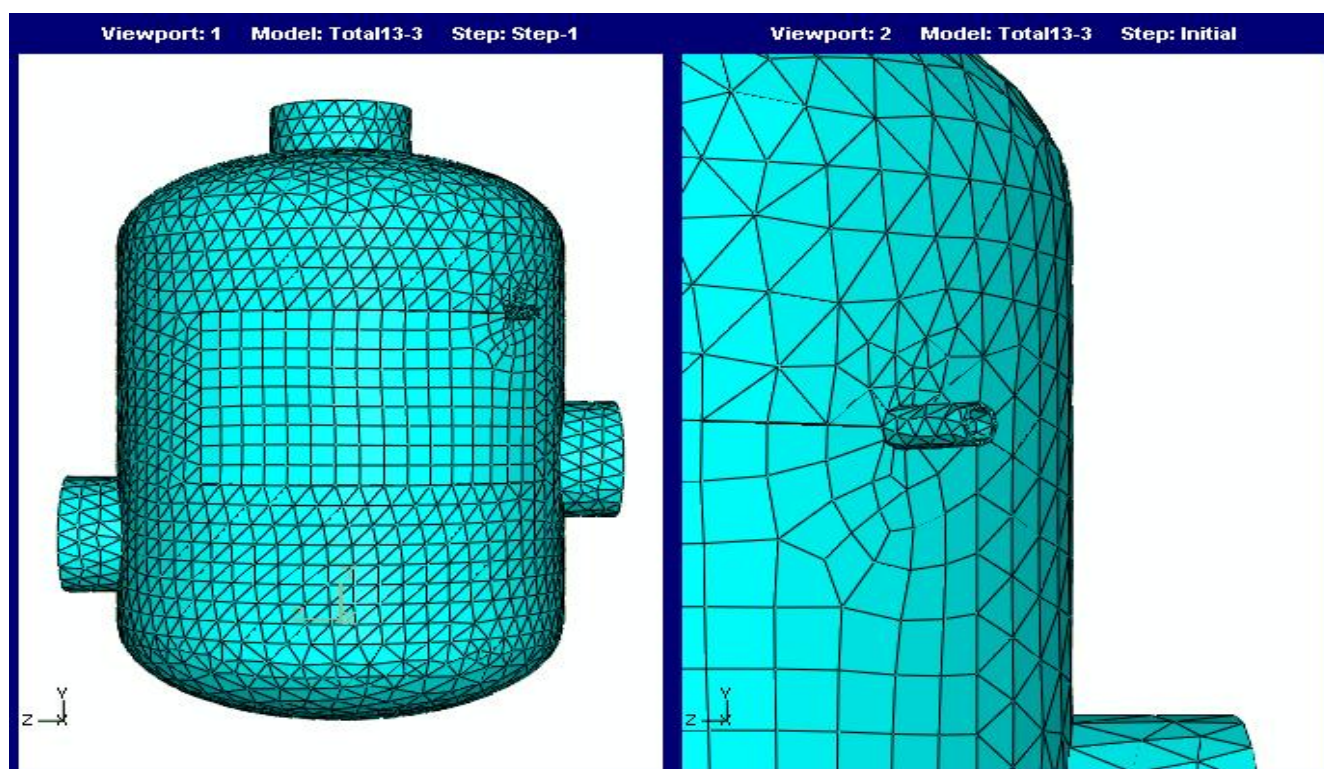


Figura 5: Malla de elementos finitos para el separador. Detalle acometida para instrumentación

Se consideró la presión interna de operación ϕP_0 (35 bar = 3500000 Pa). Se aplicó una carga puntual ϕD_3 de 100 N (10 Kg) (estimada en exceso, en forma conservativa) en el sentido negativo del eje ϕy sobre el niple de 2ϕ . Se aplicaron las tracciones en bridas ϕD_1 debidas a la presión interna sobre las acometidas de entrada, salida y boca de inspección del separador (todas de 24ϕ). También se modeló la tracción debida a la presión interna ϕD_2 en la acometida de 2ϕ de

instrumentación. Finalmente se considero el peso propio óDô. Las cargas mencionadas anteriormente se incluyeron dentro de la descripción de cargas que indica la norma, como se muestra en la **Tabla 1**.

Carga según tabla B1.1 de la norma	Magnitud	Unidades
P	3500000	Pa
Ps	0	no aplica
D	7800	Kg/m3
	9,8	m/s2
D1	2406417,11	Pa
D2	5420907,08	Pa
D3	100	N
L	0	no aplica
E	0	no aplica
W	0	no aplica
Wpt	0	no aplica
Ss	0	no aplica
T	21	°C
	32	°C

Tabla 1: Descripción de cargas según Tabla B1.1, API 579

El comportamiento elástico del material responde a la fórmula:

$$\sigma = D^{el} \varepsilon^{el} \quad (1)$$

Donde:

σ : es la tensión total (real, o tensor de tensiones de Cauchy en problemas de deformación finita).

D^{el} : es el tensor elástico de cuarto orden.

ε^{el} : es la deformación elástica total (deformación logarítmica en problemas de deformación finita).

Para el análisis se utilizó la siguiente definición de materiales.

Módulo de elasticidad $E = 2.1e11$ Pa,

Módulo de Poisson $= 0.3$

Para considerar peso propio de define la densidad:

Densidad: 7800 Kg/m^3 .

El comportamiento elastoplástico incorpora la función de fluencia, que, para el caso de plasticidad de Von Mises es independiente de la tensión hidrostática y por ende no varia con el plano octaédrico considerado. En consecuencia, dicha función depende únicamente del segundo invariante del tensor desviador de tensiones. La función vale:

$$F_{VM}(\sigma) = \sqrt{3J_2} - \sigma_{fl}(\alpha) = 0 \quad (2)$$

donde

J_2 : es el segundo invariante del tensor desviador de tensiones.

$\sigma_{fl}(\alpha)$ =tensión de fluencia (tensión de comparación). Es igual al limite elástico del ensayo uniaxial. α variable de estado.

Para el modelo se usó una tensión de fluencia de 262 MPa (38 Ksi), y se consideró el comportamiento plástico linealizado indicado en la **Tabla 2**.

SA 516N	
Tensión	Deformación
2,62E+08	0,0000
3,07E+08	0,0073
3,34E+08	0,0247
4,00E+08	0,0828
4,22E+08	0,1119
4,85E+08	0,1700

Tabla 2: Valores de tensión (en Pa) y deformación del material

Para el modelo térmico se incluyó el coeficiente de expansión térmica de $1.3\text{e-}5 \text{ } 1/^{\circ}\text{K}$. Mientras que para la conductividad térmica se uso el valor $47 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$.

3.2 IMPLEMENTACION DE LA NORMA

El Anexo B1 de API STD 579 describe el análisis de tensiones. El punto B 1.1.1.4 define los requisitos del análisis para los defectos volumétricos, según los modos de fallo posibles definidos a continuación. Si hay varios modos de falla posibles, deben verificarse todos. La norma define en algunos casos más de un procedimiento posible para cada modo de falla, se requiere que, al menos, uno de estos procedimientos sea satisfecho para calificar el componente para la operación continuada. El componente fue evaluado para cada modo de fallo aplicable, según se describe a continuación:

- Protección contra colapso plástico** - los requisitos del párrafo B1.2 deben ser satisfechos. El método de análisis utilizado es el modelado elastoplástico de tensiones, B1.2.4.
- Protección contra falla local** - Los requisitos de párrafos B1.3 deben ser satisfechos. Aquí se debe analizar la concentración de tensión en las acometidas. El análisis de colapso puede ser realizado considerando un comportamiento del material elástico (con mayores cálculos de post proceso) o uno elastoplástico (con menor postproceso). Se utilizó un análisis elastoplástico, punto B1.3.3. En esta sección del estudio de Nivel 3 se analizó el caso del niple de 2'' que se encuentra en la zona de las laminaciones, verificando en forma conservativa su carga aplicada. El análisis se realizó de acuerdo con el párrafo B1.2.4, las imperfecciones se consideraron explícitamente en la geometría del modelo.
- Protección contra colapso por pandeo** - Los requisitos del párrafo B1.4 deben ser satisfechos. Las reglas en el párrafo A.4.14 ó Tensiones compresivas permisibles y estados de carga combinados proporcionan las tensiones compresivas permisibles que se pueden utilizar para el análisis de cáscaras sujetas a tensiones compresivas y cargas combinadas. Las mediciones en el recipiente han permitido establecer que la laminación no es continua, estando por el contrario compuesta por una sucesión de pequeñas laminaciones, esparcidas sobre una gran superficie. Esta diferencia es fundamental para el caso del pandeo, la carga crítica de pandeo aumenta dramáticamente (hasta más de un orden de magnitud) cuando la laminación no es continua. Por lo tanto, este mecanismo de falla resulta no viable y no requiere ser modelado.
- Protección contra falla por fatiga debido a cargas cíclicas** - Los requisitos del párrafo B1.5 deben ser satisfechos. Se verificó si el mecanismo de falla por fatiga es posible. El

análisis de antecedentes y datos históricos de operación muestran que las variaciones de presión interna no son suficientes para justificar una probabilidad razonable de falla por propagación estable de fisuras. Por lo tanto, este mecanismo de falla resulta no viable y no requiere ser modelado.

- e) **Protección contra daño por termo fluencia o creep, y creep ñ fatiga.** Los requisitos para los componentes en condiciones de operación cíclica en el régimen de creep se cubren dentro de la Parte 10 de la norma. En este caso, el recipiente funciona a temperaturas muy por debajo de las mínimas temperaturas donde el creep puede estar presente en aceros ferríticos. Por lo tanto, este mecanismo de falla resulta no viable y no requiere ser modelado.

En virtud de lo mencionado, para cubrir los casos planteados en los puntos a) y b) se calcularon según la tabla B1.4 de la norma las siguientes combinaciones de casos de carga correspondiendo óG1 a G5ô a colapso plástico global y óLô a falla local, ver **Tabla 3** (ver conjuntamente con Tabla 1).

P[Pa]	Ps[N]	D[m/s2]	D1[Pa]	D2[Pa]	D3[N]					G1
11025000	0	30,87	7580213,9	17075857,3	315					
P[Pa]	Ps[N]	D[m/s2]	D1[Pa]	D2[Pa]	D3[N]	T[°C]	L[?]	Ss[Pa]		G2
9481500	0	26,5482	6518983,96	14685237,3	270,9	86,688	0	0		
P[Pa]	Ps[N]	D[m/s2]	D1[Pa]	D2[Pa]	D3[N]	Ss[Pa]	L[?]	OR	W[Pa]	G3
9481500	0	26,5482	6518983,96	14685237,3	270,9	0	0	OR	0	
P[Pa]	Ps[N]	D[m/s2]	D1[Pa]	D2[Pa]	D3[N]	W[Pa]	L[?]	Ss[Pa]		G4
9481500	0	26,5482	6518983,96	14685237,3	270,9	0	0	0		
P[Pa]	Ps[N]	D[m/s2]	D1[Pa]	D2[Pa]	D3[N]	E[?]	L[?]	Ss[Pa]		G5
9481500	0	26,5482	6518983,96	14685237,3	270,9	0	0	0		
P[Pa]	Ps[N]	D[m/s2]	D1[Pa]	D2[Pa]	D3[N]					L
5355000	0	14,994	3681818,18	8293987,83	153					

Tabla 3: Combinaciones de carga según Tabla B1.4 de la norma.

4 RESULTADOS

4.1 Protección contra colapso plástico - Casos G1 a G5

Se siguieron los pasos del punto B.1.2.4.4, logrando convergencia de los casos de combinaciones de carga G1 a G5 (Tabla 3), condición suficiente para verificar la estabilidad del componente bajo esas condiciones según lo establecido en el paso 5 del punto B.1.2.4.4 que se traduce a continuación: ð PASO 5 ñ Desarrolle un análisis elastoplástico para cada caso de carga definido en el PASO 4. Si la convergencia es lograda, el componente es estable bajo las cargas aplicadas para este caso de carga. De otro modo, la configuración del componente (por ejemplo el espesor) debería ser modificado o las cargas aplicadas reducidas y el análisis repetidoô

En la **Figura 6** se muestra la correspondencia entre los análisis, archivos y combinaciones de carga considerados. La convergencia y aptitud contra colapso plástico lograda en el modelo fue realizada para la condición de operación de 35 bar. Luego se intentó verificar el componente con presión interna de diseño de 63,5 bar, y sus tracciones de bridas correspondientes, estado de cargas que no verificó convergencia. Por tanto, no se puede asegurar aptitud para el servicio de acuerdo a API STD 579 si la presión de operación supera los 35 bar, para lo cual será necesario reevaluar la geometría de las laminaciones adoptadas, las cargas aplicadas, etc. ejecutando un modelado de mayor detalle.

Job-Total13-1	Total13-1	Full Analysis	Completed	Caso G1
Job-Total13-2	Total13-2	Full Analysis	Completed	Casos G3,G4,G5
Job-Total13-3	Total13-3	Full Analysis	Completed	Caso L
Job-Total13-4	Total13-4	Full Analysis	Completed	Caso G2

Figura 6: Vinculación entre los archivos, modelos, convergencia lograda y combinaciones de carga

4.2 Protección contra falla local - Caso L

Se siguieron los pasos del punto B.1.3.3.1 para la combinación de carga del caso L (Tabla 3). Se deben elegir puntos significativos del componente donde el colapso local sea factible. Se elige el punto de integración del elemento 11795 (rojo en la **Figura 7**), por ser el punto mas solicitado para esa combinación de carga. En la figura también se puede observar la laminación modelada.

La deformación plástica equivalente ε_{peq} para el punto de análisis es cero, por no llegar el componente a la plastificación. También debe considerarse cero la deformación de conformado ε_{cf} debida a que se realizó un alivio de tensiones posterior a su conformado, según se mencionó en la descripción del recipiente en la introducción de este trabajo. En forma simultánea se debe calcular la deformación límite ε_L en función de las tensiones principales y la equivalente de Von Mises en el mismo punto, según la ecuación 3.

$$\varepsilon_L = \varepsilon_{Lu} \cdot \exp \left[- \left(\frac{\alpha_{sl}}{1 + m_2} \right) \left(\left\{ \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3\sigma_e} \right\} - \frac{1}{3} \right) \right] \quad (3)$$

En Tabla B.6 de la norma figuran los demás factores. La ecuación (3) resulta para este caso en 0,284. Se verifica la condición (4) y por tanto, el caso de carga L.

$$\varepsilon_{peq} + \varepsilon_{cf} \leq \varepsilon_L \quad (4)$$

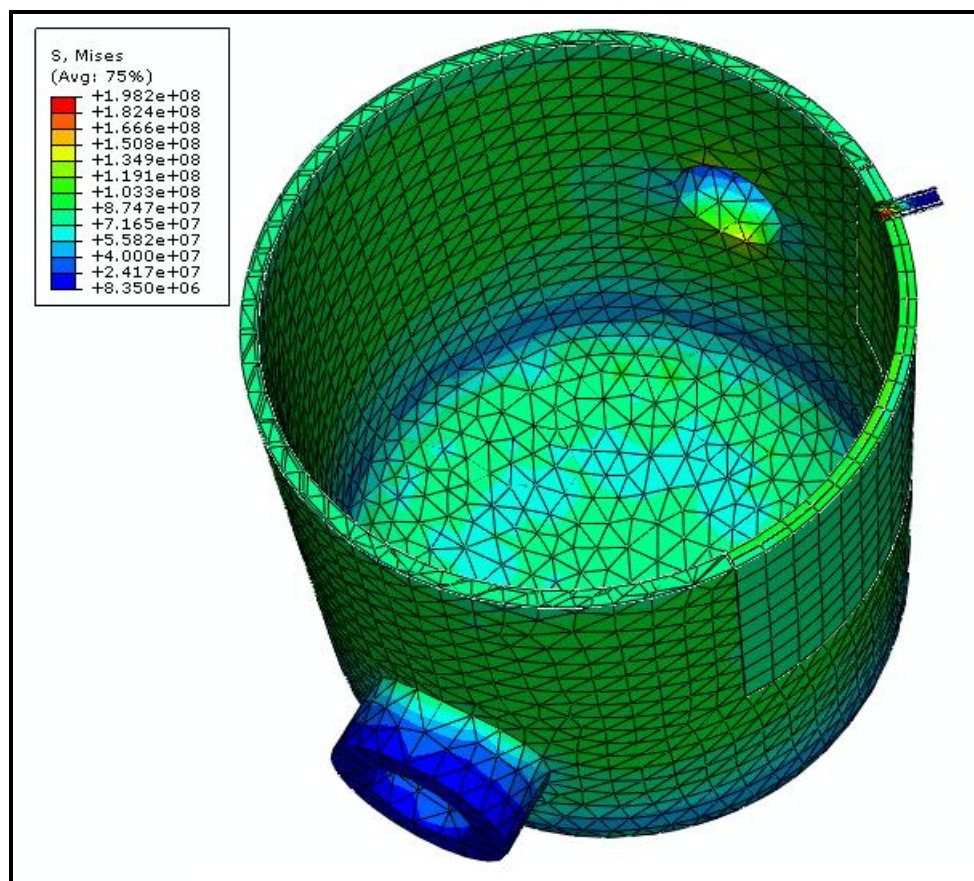


Figura 7: Punto mas solicitado donde se verifica la falla local

5 CONCLUSIONES

Se presenta la implementación del modelo de elementos finitos para la Evaluación de Aptitud para el Servicio (FFS) de un Separador operativo por cinco años, que presentaba discontinuidades definidas como laminaciones debidas al proceso de fabricación del material. Se uso el Nivel 3 de la nueva edición de la API STD 579 ASME FFS-1. Se destacan los aspectos más importantes de la simulación.

Se consideró como carga a la presión interna de operación y las tracciones en bridas debidas a la presión interna. Se consideró el peso del instrumento en el niple de 20" y el peso propio del recipiente. Se verificó que las condiciones de contorno y las cargas aplicadas producían las deformadas del recipiente acorde a lo esperado.

Se verificó en forma satisfactoria los casos a) y b) del punto B 1.1.1.4 de API 579, siguiendo el procedimiento de norma. Se consideraron no viables los casos c), d) y e) del punto B 1.1.1.4, justificándose su no viabilidad para la geometría de defecto en estudio.

El modelo numérico realizado es representativo de la situación planteada. Se modeló la discontinuidad (laminaciones) en forma explícita y se corrieron modelos elastoplásticos. Los resultados obtenidos satisfacen la verificación tensional por medio del NIVEL 3 de API STD 579 en la zona laminada. Se aseguró aptitud para el servicio de acuerdo a API STD 579 para la presión de operación de 35 bar. Sin embargo, no se verificó convergencia para la presión interna de diseño de 63,5 bar, por lo cual para asegurar aptitud para el servicio para una presión mayor a 35 bar sería necesario reevaluar la geometría de las laminaciones adoptadas, las cargas aplicadas, etc. ejecutando un modelado de mayor detalle.

Se recomendó un monitoreo semestral por medio de equipo de ultrasonido, para verificar si existe un crecimiento en las discontinuidades existentes. Se solicitó comparar los registros de señales de ultrasonidos de la inspección de Julio de 2007 con las siguientes inspecciones. De no existir un crecimiento en las laminaciones, luego de dos inspecciones se sugirió extender el monitoreo a una frecuencia anual.

Para que el modelado y análisis realizado tenga validez en el tiempo se solicitó la no modificación del trazado ni los soportes de las cañerías que se encuentran vinculados al Separador. Además se recomendó no instalar cargas en el soporte que se encuentra junto a la acometida de 20

6 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa GIE S.A. Consultora de Ingeniería por permitir la divulgación de información confidencial. Esta investigación tuvo también el apoyo de CONICET (PIP 6257), de la Agencia de Promoción Científica (PICTO 609/04) y de la Universidad Nacional de Mar del Plata (Subsidio 15/G158).

7 REFERENCIAS

- [1] Process Equipment Fitness-for-Service Assessments Using API RP 579, Carl E. Jaske, Process & Power Plant Reliability Conference, November 7-8, 2001
- [2] Cañerías y Recipientes de Presión, Otegui J. L.-Rubertis E, - ISBN 9789871371112 - Editorial EUDEM, 2008
- [3] Advanced Acoustic Emission for On-stream Inspection of Petrochemical Vessels, M.F. Carlos, D. Wang, S.J. Vahaviolos, P. Feres, PANNDT Conference, Brazil 2003
- [4] Global and local plastic collapse solution for defect assessment in gas pipeline, Jong-hyun Baek, Woo-sik Kim, Jae-boong Choi, Korean Gas Union, 2004
- [5] Fitness-for-service assessment of spherical pressure vessels with hot spots, P. Tantichattanont - S.M.R. Adluri- R. Seshadri, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Volume 84, Issue 12, December 2007, Pages 762-772
- [6] FITNET FFS procedure: A unified European procedure for structural integrity assessment, Gutiérrez-Solana - S. Cicero^a, Engineering Failure Analysis Volume 16, Issue 2, March 2009, Pages 559-577
- [7] API STD 579 ASME FFS-1 (Junio 2007), Parte 13, 2007
- [8] Manuales de Documentación Software Simulia-Abaqus FEA, Dassault Systemes, 2007