

Metodología para la Evaluación de Recipientes de Coquización Retardada empleando Análisis por Elementos Finitos y Análisis de Mecánica de Fractura

Eduardo Rincón, PDVSA Intevep, rinconej@pdvsa.com

Egler Araque, PDVSA Intevep, araqueee@pdvsa.com

Gabriel Vivas, PDVSA Intevep, vivasga@pdvsa.com

Armando Moret, PDVSA Intevep, moreta@pdvsa.com

Sinopsis

Coquización Retardada es un proceso semi-continuo de conversión térmica. Tiene como objetivo convertir residuos provenientes de las plantas de destilación al vacío, en productos de mayor valor agregado, junto con la producción de coque sólido como subproducto. Entre los equipos principales del proceso se encuentran los recipientes de coque, por lo que un diseño deficiente de los mismos puede conducir a paradas frecuentes y baja productividad. En investigaciones previas, se ha identificado a la fatiga por bajo ciclaje (FBC), causada por los gradientes térmicos, como uno de los mecanismos de falla predominante. El enfriamiento desigual causado por los canales o ramificaciones creadas a través del coque durante la inyección de agua, genera esfuerzos que abomban y agrietan la pared del tambor. Muchas de las grietas son detectadas después de varios años de operación y aparecen en las áreas de alta concentración de esfuerzo. La mayoría de las grietas en la falda del tambor son circunferenciales y ocurren cerca de las soldaduras de la unión entre la falda y la pared del recipiente.

Este artículo presenta una metodología para la evaluación de recipientes de coquización retardada. Dicha metodología consiste en la evaluación de la integridad mecánica de los recipientes a través de un modelo en elementos finitos, mediante el estudio de los esfuerzos y deformaciones en estos equipos, utilizando como datos las mediciones de deformación de la superficie obtenidas por medio de la técnica de escaneo láser, así como los valores de temperatura y presión capturados en campo. Adicionalmente, se realiza el estudio de vida remanente y análisis por medio de mecánica de fractura. Esta metodología permite disminuir significativamente los costos asociados a inspección y reparación de grietas, paradas de plantas no programadas y reemplazo prematuro de los equipos a través del uso de herramientas computacionales y de inspección de tecnología de avanzada.

Introducción

El proceso en las plantas de Coquización Retardada tiene como objetivo convertir residuos provenientes de las plantas de destilación al vacío, en productos de mayor valor agregado (gases licuados de petróleo, naftas y gasóleos), junto con la producción de coque sólido como subproducto. Este es un proceso semi-continuo, netamente térmico. Los recipientes de coque son uno de los componentes principales en el proceso, por lo que un diseño deficiente de los mismos puede conducir a paradas frecuentes y baja productividad.

Los tambores de coque son recipientes a presión, usados en el proceso de coquización retardada durante las operaciones de crudo pesado en las refinerías. Estos equipos operan bajo severos ciclos de calentamiento y enfriamiento, lo que genera esfuerzos térmicos repetitivos sobre las paredes de los tambores, los cuales a su vez producen abombamiento o deformaciones del diámetro que se extienden de forma parcial o completa a través de la circunferencia del recipiente en diferentes

alturas del mismo, causando la disminución de la vida útil de los tambores de coquización en comparación a otros recipientes de presión que operan en condiciones no cíclicas.

En investigaciones previas, se ha identificado a la fatiga por bajos ciclos (FBC), causada por los ciclos de esfuerzos térmicos, como uno de los mecanismos de falla predominante. El enfriamiento desigual causado por los canales o ramificaciones creadas por la inyección de agua a través del coque, genera esfuerzos que abomban y agrietan la pared del tambor. Muchas de las grietas son detectadas después de varios años de operación y aparecen en las áreas de alta concentración de esfuerzo. La mayoría de las grietas en la falda del tambor son circunferenciales y ocurren cerca de las soldaduras de la unión entre la falda y la pared del recipiente.

El objetivo de este trabajo es presentar la metodología empleada para la evaluación de la integridad mecánica de los recipientes a través de un modelo en elementos finitos, mediante el estudio de los esfuerzos y deformaciones en estos equipos, utilizando como datos las mediciones de deformación de la superficie obtenidas por medio de la técnica de escaneo láser, así como los valores de temperatura y presión capturados en campo. Adicionalmente, se muestra el estudio de vida remanente y análisis por medio de mecánica de fractura. Esta metodología permite disminuir significativamente los costos asociados a inspección y reparación de grietas, paradas de plantas no programadas y reemplazo prematuro de los equipos a través del uso de herramientas computacionales y de inspección de tecnología de avanzada

Desarrollo

El análisis de esfuerzos se realiza mediante la técnica de elementos finitos con el uso de un programa comercial. Se considera el efecto de las cargas térmicas y mecánicas a los cuales se ven expuestos los recipientes. La evaluación de los recipientes se fundamenta en dos zonas; la primera de ellas comprendida por la unión cono - faldón de los tambores de coque, para la cual se realiza un modelo computacional axisimétrico obteniendo como resultado la distribución de esfuerzos en esta sección por la influencia de presión y del gradiente térmico durante un ciclo normal de operación y basados en estos datos se determina el tamaño crítico de las grietas que se pueden generar en esta zona.

La segunda zona para el estudio esta constituida por la sección cilíndrica de los tambores, para la cual se realizan los modelos computacionales (uno por cada recipiente) considerando el estado de deformación actual según mediciones realizadas mediante la técnica de escaneo láser. En la figura 1 se observa un esquema de un tambor de coque y el detalle de la unión faldón recipiente.

Descripción de los modelos

Para determinar el estado de esfuerzos se utiliza el método del elemento finito. Se define la geometría de la estructura y se establecen las propiedades de los elementos que la conforman (configuración, tipo de material, restricciones).

Inicialmente se realiza el modelo axisimétrico para analizar la unión cono - faldón (ver Figura 2), para este modelo se utilizan elementos rectangulares; luego se realiza el modelo de la sección cilíndrica de cada uno de los tambores de coquización (ver Figura 3) utilizando elementos rectangulares tipo cáscara "shell". La malla de todos los modelos se refinan hasta alcanzar la convergencia numérica.

Para realizar el modelo de la sección cilíndrica se efectúa la medición de las deformaciones actuales de los tambores de coque mediante la técnica de "Laser Scan". Los datos suministrados adquiridos, utilizan como referencia para la medición de altura la línea tangente inferior ubicada entre el cilindro y el cono, y la medición de ángulos en sentido anti-horario considerando como 0° el norte geográfico.

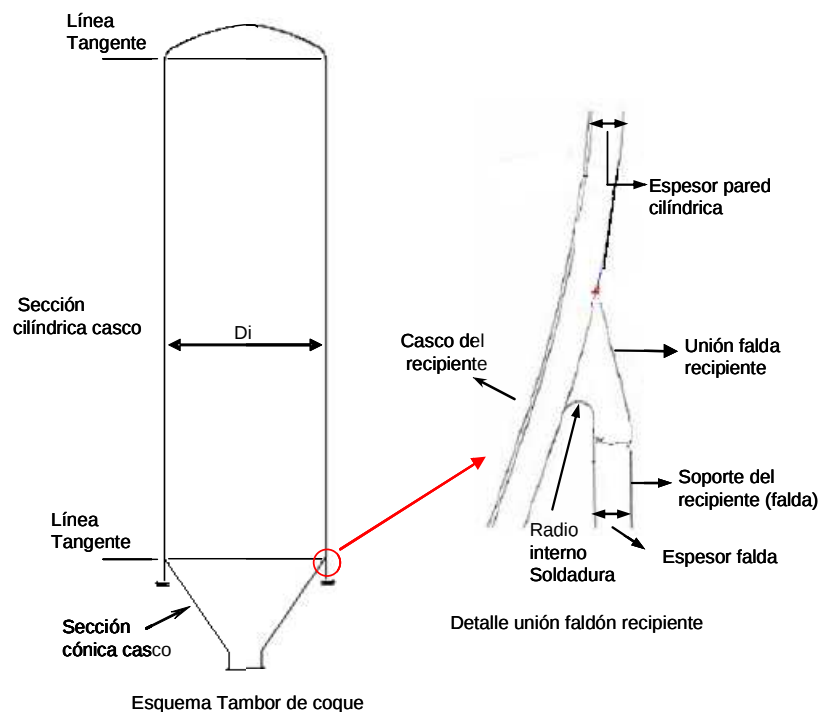


Fig. 1. Esquema de un tambor de coque y detalle de la unión faldón recipiente

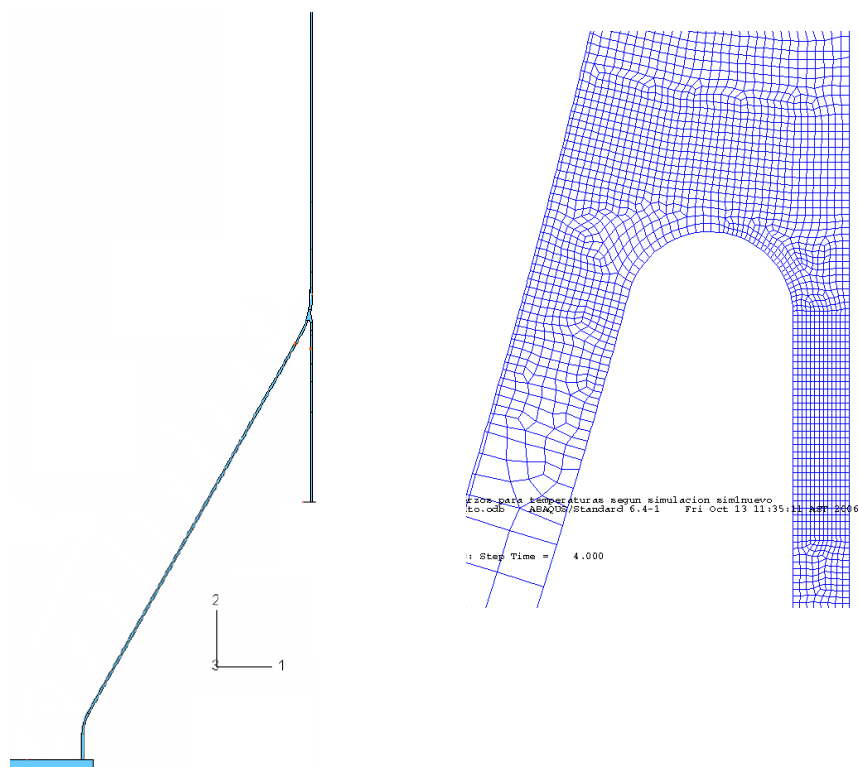


Fig. 2. Modelo de la unión faldón recipiente de un tambor de coque

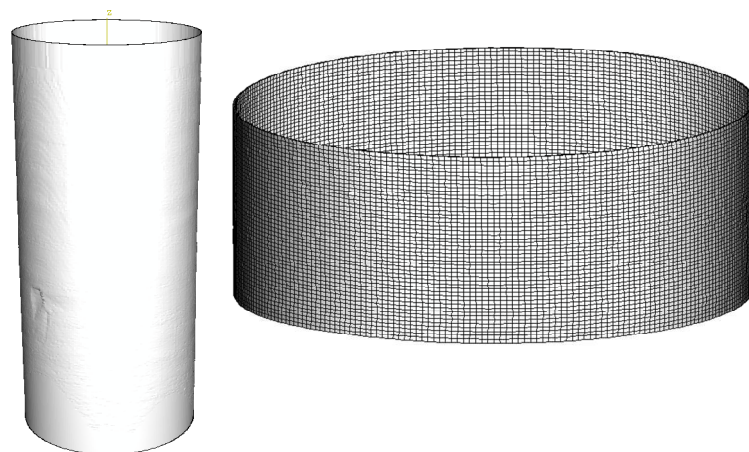


Fig. 3. Modelo de la sección cilíndrica de un tambor de coque

Análisis por elementos finitos

Desarrollados los modelos geométricos, se elaboran los modelos térmicos y mecánicos para el análisis. En una primera etapa se realiza un modelado térmico, cuyas condiciones de borde se establecen sobre la base del perfil de temperatura registrado en campo. En la segunda etapa se estiman los esfuerzos, para ello se combina el perfil de temperatura obtenido en la evaluación térmica y las cargas mecánicas producto de la presión interna

El modelo axisimétrico contiene la unión faldón recipiente, la sección cónica y la falda o soporte del recipiente. El modelo tipo "shell" contiene la sección cilíndrica del recipiente. Se establecen las propiedades de los materiales involucrados en el análisis: Módulo Young, coeficiente de Poisson, límite elástico, densidad y coeficiente de expansión térmica. Estas propiedades se obtienen del Código ASME, Sec. II Parte D, "Propiedades de los Materiales". Un valor fijo de la densidad del acero es utilizado en el análisis. Se aplican las mismas propiedades del material para la soldadura y el material base.

Análisis de Transferencia de Calor

El objetivo de este análisis es obtener la distribución de temperatura transitoria en el recipiente, para ser utilizada como dato en el análisis de esfuerzos. Para ello se consideran los datos de mediciones de temperatura realizadas en campo, por medio de termocuplas ubicadas en un recipiente. Luego, se consideran las propiedades físicas dependientes de la temperatura (conductividad térmica, calor específico) las cuales son obtenidas del Código ASME, Sección II, Parte D, "Material Properties". [3]. El efecto de la radiación a lo largo de la "caja caliente" (hot box) en el modelo de la unión faldón recipiente, la conducción a través del material de revestimiento y la convección con el ambiente son usados como condiciones de borde, así como también las mediciones de temperatura realizadas en campo en la pared externa del recipiente. La figura 4 muestra las condiciones de bordes utilizadas en este modelo.

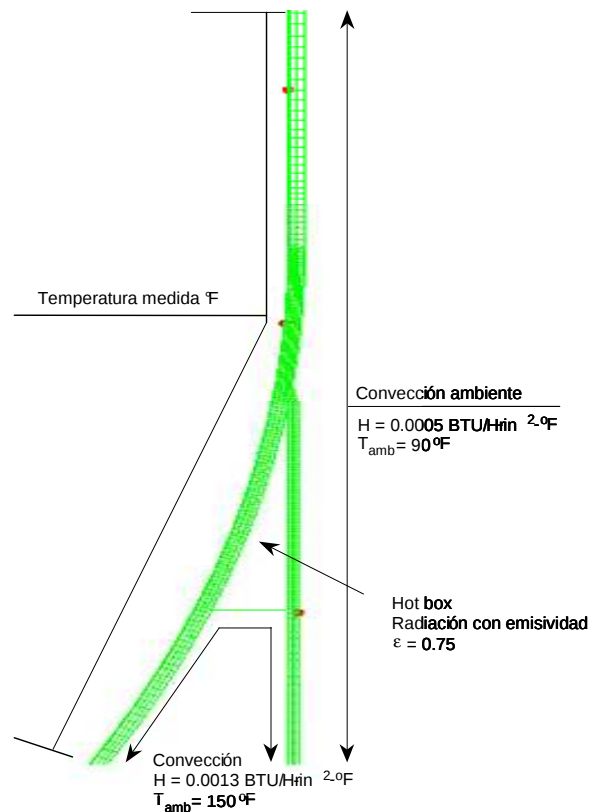


Fig 4. Condiciones de borde para el análisis de transferencia de calor de la unión faldón recipiente

Análisis de Esfuerzos

Para el análisis de esfuerzos se utiliza el mismo modelo de elemento finito empleado en el análisis de transferencia de calor. Este análisis considera las cargas térmicas y mecánicas a las cuales se encuentran sometidos los recipientes de coquización retardada durante su operación. El modelo analítico se desarrolla sobre la base de un análisis del tipo lineal-elástico. Se establecen como condiciones de carga a la aplicación de la presión interna cuyo valor se asume constante y de igual magnitud que el valor de diseño más la carga producto del gradiente de temperatura estimado en el análisis de transferencia de calor.

Se debe asignar como condición de borde la restricción de desplazamiento correspondiente al diseño de la falda en el modelo axisimétrico y restringir el desplazamiento en la base del cilindro en el modelo tipo "shell". Adicionalmente, se considera que no existe pérdida de espesor en los recipientes y que las propiedades del material corresponden a las establecidas en el Código ASME de construcción del recipiente. La figura 5 muestra las condiciones de cargas y de borde utilizadas en este modelo.

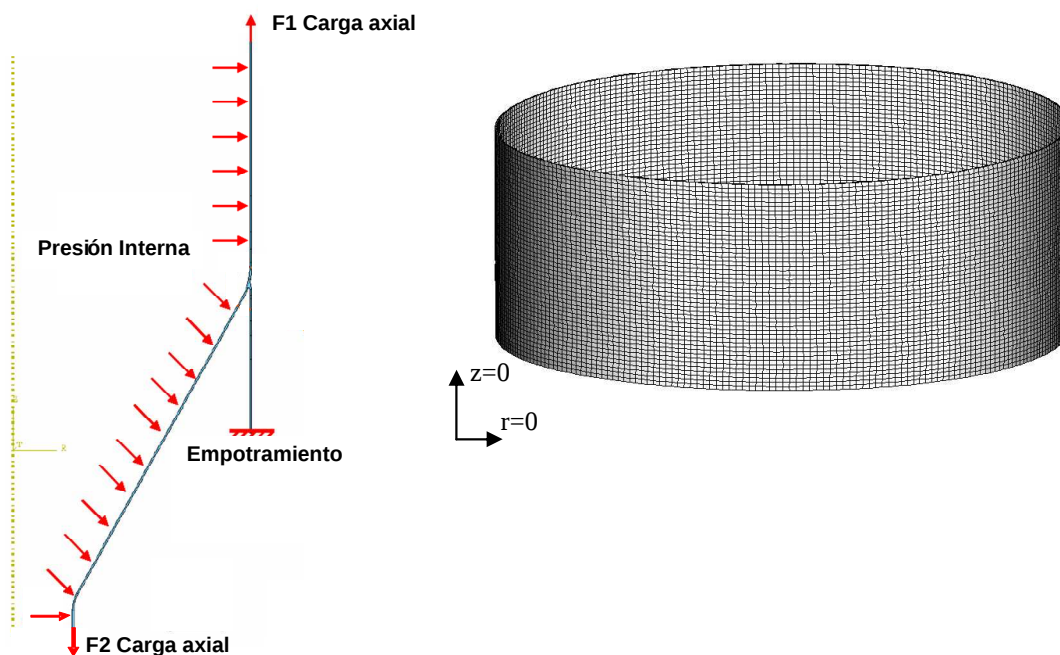


Fig 5. Condiciones de borde y carga para el análisis de esfuerzos

Análisis de mecánica de fractura

Para el análisis de mecánica de fractura se consideran los esfuerzos secundarios debido a los gradientes térmicos, el valor de tenacidad a la fractura siguiendo el criterio de deformación plana y el factor de seguridad. Los criterios utilizados para determinar el tamaño crítico de grieta son los indicados en la API 579 / ASME FFS-1 "Adecuación para Servicio".

Resultados y discusión

Los resultados que se muestran a continuación están basados en las mediciones de temperatura realizadas durante uno de los ciclos monitoreados de una unidad de coquización retardada perteneciente a una refinería de PDVSA en 2005-2006. La figura 6 muestra la temperatura del tambor durante un ciclo de operación.

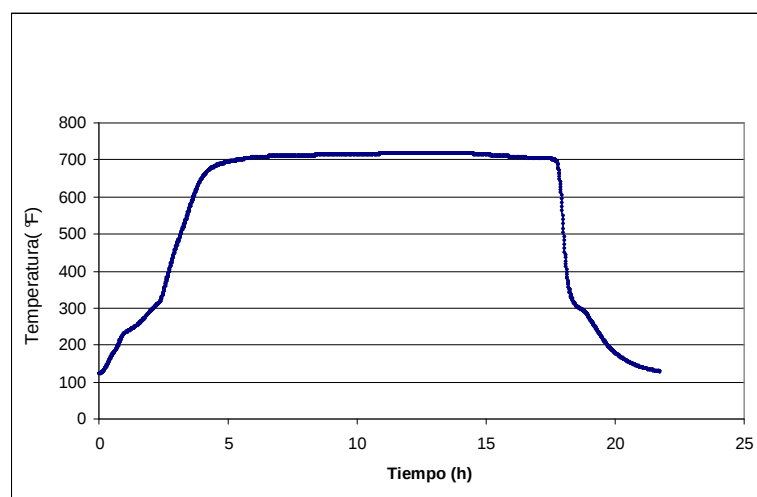


Fig. 6. Temperaturas medidas en campo

Resultados de la sección unión cono - faldón

Para la sección unión cono - faldón se evalúa la distribución de esfuerzos bajo el criterio de Von Mises y se comparan los resultados con los valores admisibles para el material de fabricación según el código ASME Sección II [3], a la temperatura máxima de diseño del material. El esfuerzo máximo se evalúa según el límite establecido por la API 579 / ASME FFS 1, el cual establece dos criterios; el primero considera la evaluación de esfuerzos primarios (solo efecto de presión), el cual indica que el valor del esfuerzo obtenido no debe sobrepasar el límite de esfuerzo admisible (S_m) y el segundo criterio indica que para esfuerzos primarios en conjunto con esfuerzos secundarios (producto del gradiente térmico) no debe sobrepasar el límite de $3 S_m$.

Adicionalmente se obtienen los esfuerzos longitudinales y circunferenciales de esta sección durante un ciclo de operación. Se realiza un análisis de mecánica de la fractura para estimar los tamaños de grietas críticos basados en los valores de los esfuerzos longitudinales.

En la Figura 7 se presenta la distribución de temperatura en la unión cono - faldón. La distribución de los esfuerzos bajo el criterio de Von Mises y considerando únicamente la aplicación de la presión de diseño se presenta en la figura 8. La zona de la superficie interna de la unión cono - faldón presenta el máximo esfuerzo a tracción. No se presentan esfuerzos a compresión en la distribución.

La Figura 9 muestra el estado de esfuerzos de la unión cono - faldón según el criterio de Von Mises, considerando la aplicación de cargas por presión y el efecto de los gradientes térmicos en un ciclo normal de operación del tambor de coque; el esfuerzo máximo obtenido esta ubicado en la superficie interna de la unión. La distribución de esfuerzos longitudinales en la unión cono - faldón se presenta en la figura 10.

Los esfuerzos longitudinales tienen un comportamiento alternante durante un ciclo normal de operación, las zonas con mayor valor de esfuerzo alternante son catalogadas como las más críticas y deben ser consideradas para el estudio de crecimiento de grietas (en dirección circunferencial) debido a la amplitud de sus esfuerzos y a que estos se encuentran a tracción.

La evaluación de mecánica de la fractura se realizó según los criterios de la API 579 / ASME FFS 1 Parte IX [5] considerando la aplicación en conjunto de los esfuerzos primarios y secundarios y un crecimiento de grieta en dirección circunferencial desde la superficie interna de un cilindro (ver Figura 11), utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_{ref} = \frac{P_b + (P_b^2 + 9[ZP_m]^2)^{0.5}}{3} \quad [\text{Ec. 1}]$$

donde:

$$P_m = \frac{pR_i^2}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{F}{\pi(R_o^2 - R_i^2)} \quad [\text{Ec. 2}]$$

$$P_b = 0 \quad [\text{Ec. 3}]$$

$$Z = \left[\frac{2\alpha}{\pi} - \frac{x\theta}{\pi} \left(\frac{2 - 2\tau + x\tau}{2 - \tau} \right) \right]^{-1} \quad [\text{Ec. 4}]$$

$$\alpha = \arccos(Asen(\theta)) \quad [\text{Ec. 5}]$$

$$A = x \left[\frac{(1-\tau)(2-2\tau+x\tau) + (1-\tau+x\tau)^2}{2[1+(2-\tau)(1-\tau)]} \right] \quad [\text{Ec. 6}]$$

$$\tau = \frac{t}{R_o} \quad [\text{Ec. 7}]$$

$$x = \frac{a}{t} \quad [\text{Ec. 8}]$$

$$\theta = \frac{\pi c}{4R_i} \quad (\text{Para grieta en superficie interna}) \quad [\text{Ec. 9}]$$

donde:

F: Fuerza axial actuando sobre la línea

p: Presión

P_m: Esfuerzo membrana

P_b: Esfuerzo de flexión

R_i: Radio interno

R_o: Radio externo

t: Espesor

c: Longitud de la grieta

a: Profundidad de la grieta

σ_{ref}: Esfuerzo de referencia

- Cálculo de la tenacidad a la fractura (**K_I**) del material según ecuación 10

$$K_I = \left[G_0 \sigma_0 + G_1 \sigma_1 \left(\frac{a}{t} \right) + G_2 \sigma_2 \left(\frac{a}{t} \right)^2 + G_3 \sigma_3 \left(\frac{a}{t} \right)^3 + G_4 \sigma_4 \left(\frac{a}{t} \right)^4 + G_5 \sigma_5 + G_6 \sigma_6 \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad [\text{Ec. 10}]$$

donde:

$$G_o = A_o + A_1 \beta + A_2 \beta^2 + A_3 \beta^3 + A_4 \beta^4 + A_5 \beta^5 + A_6 \beta^6 \quad [\text{Ec. 11}]$$

$$\beta = \frac{2\varphi}{\pi} \quad [\text{Ec. 12}]$$

donde:

φ: Ángulo elíptico

A_i: Tomarlo de la Tabla B-1 de la norma API 579 / ASME FFS 1

Resultados de la sección cilíndrica

Para la sección cilíndrica se evalúa la distribución de esfuerzos según el criterio de Von Mises bajo cargas de presión de diseño y se comparan los resultados con los valores admisibles según la API 579 / ASME FFS 1 que establece dos criterios de evaluación, el primero aplica un límite de 1,5 S_m para esfuerzos máximos de membrana, y el segundo criterio considera el promedio del esfuerzo en la pared del recipiente y los compara con el esfuerzo admisible S_m.

En la Figura 12 se muestra la distribución de deformaciones máximas y mínimas con respecto al radio medio del cilindro, en donde se identifican los abultamientos o hundimientos del cuerpo cilíndrico (Bulging). En las Figuras 13 y 14 se presenta la distribución de esfuerzos Von Mises en la membrana externa y en el promedio respectivamente. En las Figuras 15 y 16 se despliega la distribución de esfuerzos longitudinales en la membrana externa y en el promedio respectivamente. En las Figuras 17 y 18 se muestra la distribución de esfuerzos circunferenciales en la membrana externa y en el promedio respectivamente.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

La aplicación de esta metodología en las diferentes unidades de coquización retardada permite determinar con mayor precisión el estado y la vida útil de los tambores de coquización, lo cual disminuye significativamente los costos asociados a inspección y reparación de grietas, paradas de plantas no programadas y reemplazo prematuro de los equipos a través del uso de herramientas computacionales y de inspección con tecnología de avanzada.

La metodología presentada para la evaluación de recipientes de coquización retardada consiste, en la evaluación de la integridad mecánica de los recipientes a través de un modelo en elementos finitos, mediante el estudio de los esfuerzos y deformaciones en estos equipos, utilizando como datos las mediciones de deformación de la superficie obtenidas por medio de la técnica de escaneo láser, así como los valores de temperatura y presión capturados en campo. Adicionalmente, se realiza el estudio de vida remanente y análisis por medio de mecánica de fractura.

La medición de la deformación de la sección cilíndrica del recipiente mediante las técnicas de escaneo láser es requerida como datos de entrada para el modelo de elementos finitos en orden de determinar el efecto de la geometría, crecimiento de deformación y abombamiento "bulging", velocidad de formación de grietas y tasa de crecimiento de grietas.

El desarrollo de un modelo axisimétrico para la evaluación de la unión soldada entre el recipiente y el faldón del tambor permite determinar la distribución de un estado transitorio de temperatura y la distribución de esfuerzo/deformación a lo largo del ciclo.

El análisis por elementos finitos de la sección cilíndrica por medio de un modelo 3D tipo "shell", permite estimar el estado de esfuerzo al cual se encuentra sometido el recipiente.

La predicción de la propagación de grietas es realizado bajo los criterios fundamentales de los procedimientos de mecánica de fractura y los criterios de API 579 / ASME FFS 1 "Adecuación para Servicio" y permite estimar el tiempo (número de ciclos) necesario para que a partir del tamaño de grieta inicial esta alcance el tamaño crítico.

Recomendaciones

Aplicar esta metodología en las diferentes unidades de coquización retardada con el fin de determinar el estado y la vida útil de los tambores de coquización, lo cual disminuye significativamente los costos asociados a inspección y reparación de grietas, paradas de plantas no programadas y reemplazo prematuro de los equipos a través del uso de herramientas computacionales y de inspección de tecnología de avanzada

Desarrollar planes de inspección para los recipientes de coquización retardada que incluyan la medición de deformación de la pared cilíndrica de los equipos mediante la utilización de la técnica de escaneo láser o "Laser Scan", la frecuencia de estas inspecciones debe ser determinada de acuerdo a la severidad de las deformaciones medidas.

Realizar seguimiento en línea de los valores de temperatura y deformación mediante la adquisición de los datos a través de termocuplas y galgas extensiométricas "Strain Gauges" instaladas en las zonas de interés de los recipientes de coquización retardada

Conformar mesas de trabajo con tópicos relacionados a la adecuación para servicio de los tambores, donde participen expertos, custodios, operadores y mantenedores de estas unidades. La participación de estas personas permitirá analizar experiencias en otras instalaciones y lecciones aprendidas, que son de provecho en el manejo de sus recipientes, así como, el fortalecimiento técnico del personal y la independencia tecnológica de terceros.

Referencias Bibliograficas

- [1] Dassault Systemes Simulia Corp. Abaqus. Version 6.4.
- [2] API 579/ ASME FFS-1. Fitness For service. First edition. 2007. Section IX and appendix B
- [3] ASME Bolier & Pressure Vessel Code Section II Part D, Materials Properties. 2007.
- [4] Caballero Ramón. Mecánica de fractura lineal elástica y sus aplicaciones. 2007. Pág 65.
- [5] API 579 / ASME FFS-1. Fitness For service. First edition. 2000. Section IX and appendixes C, D and F
- [6] Ramos A., Rios C., Hasegawa T., Tahara T., Vargas J; "Mechanical Integrity Evaluation of Delayed Coke Drums), PVP-Vol 359, Fitness for Adverse Environments in Petroleum and Power Equipment ASME 1997. pp 291-298.
- [7] Ramos A., Rios C., Johnsen E., Gonzalez M., Vargas J.; "Delayed Coke Drum Assessment Using Field Measurements and FEA", PVP-Vol 368, Analysis and Design of Composite, Process, and Power Piping and Vessel-1998, ASME 1998, pp. 231-237.

Figuras

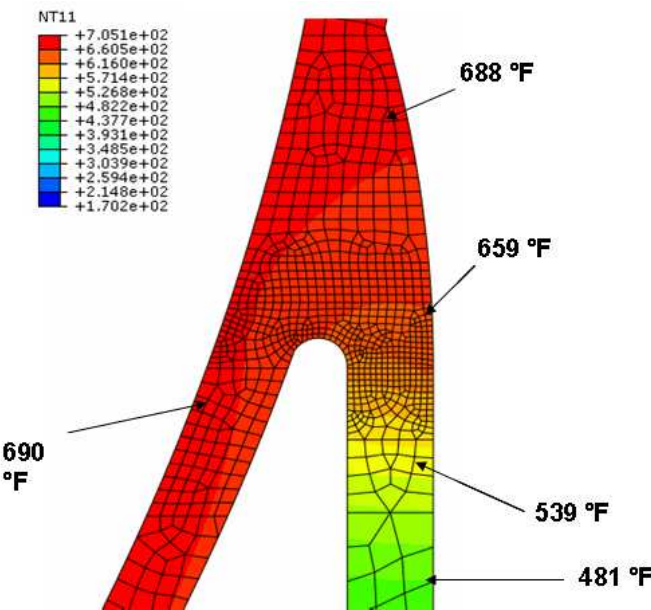


Fig. 7. Distribución de temperaturas en la unión cono - faldón

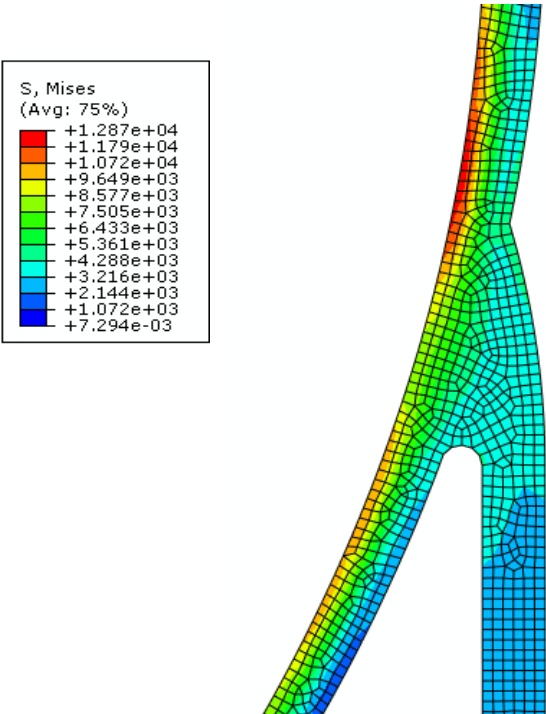


Fig. 8. Distribución de esfuerzos en la unión cono - faldón bajo cargas de presión

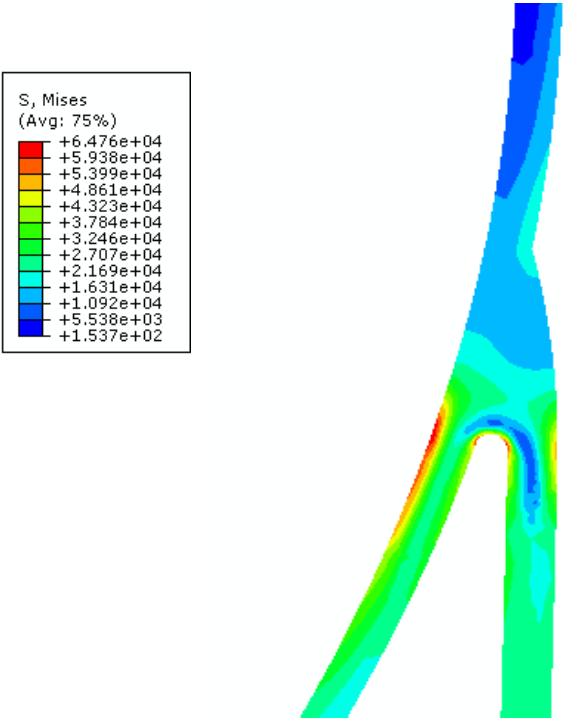


Fig. 9. Distribución de esfuerzos en la unión cono - faldón bajo cargas primarias y secundarias

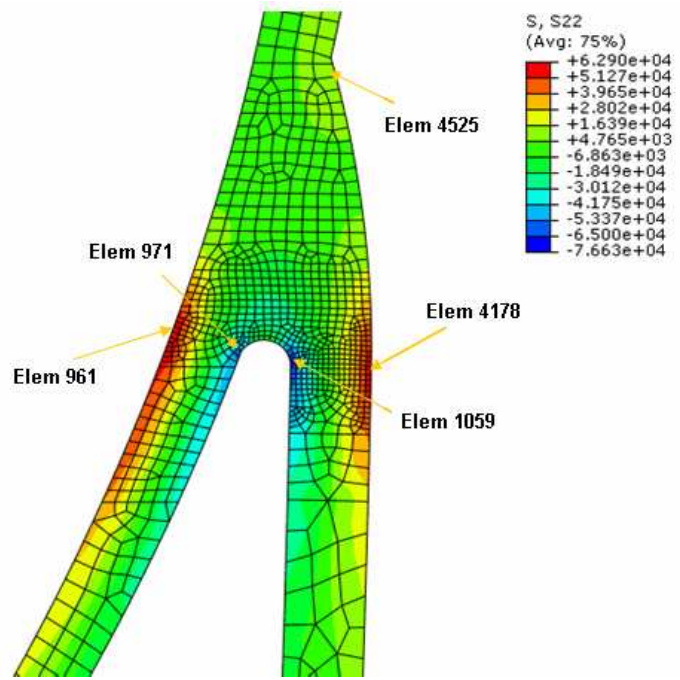


Fig. 10. Distribución de esfuerzos longitudinales en la unión cono - faldón

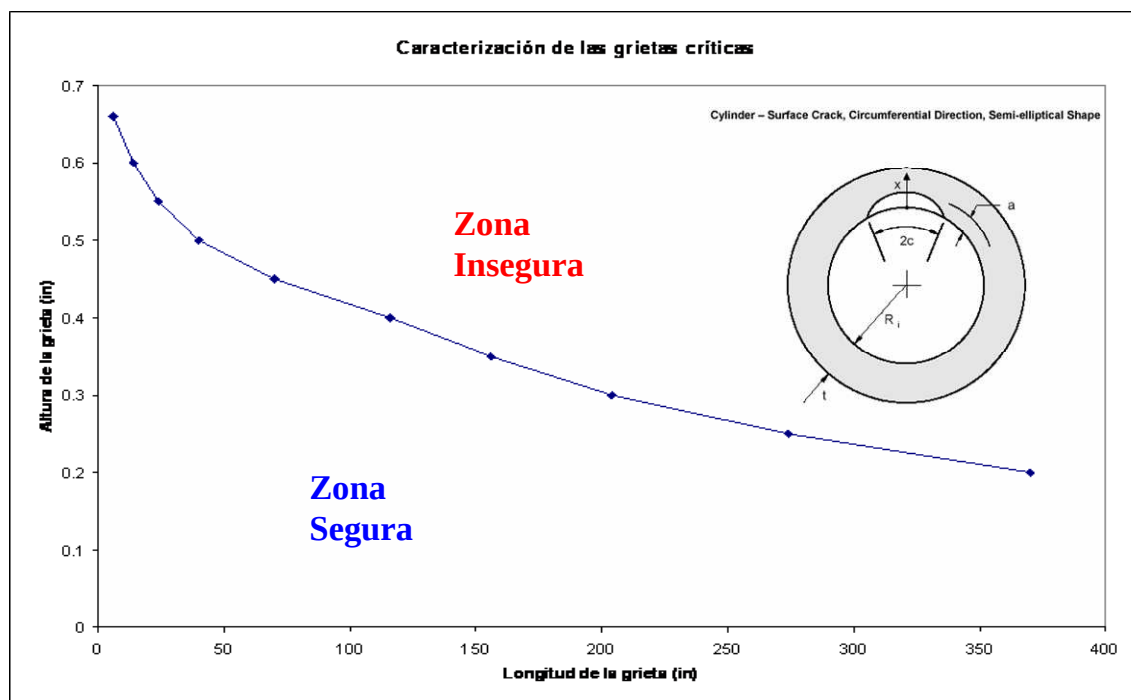


Fig. 11. Dimensiones críticas de las grietas con crecimiento desde la superficie interna

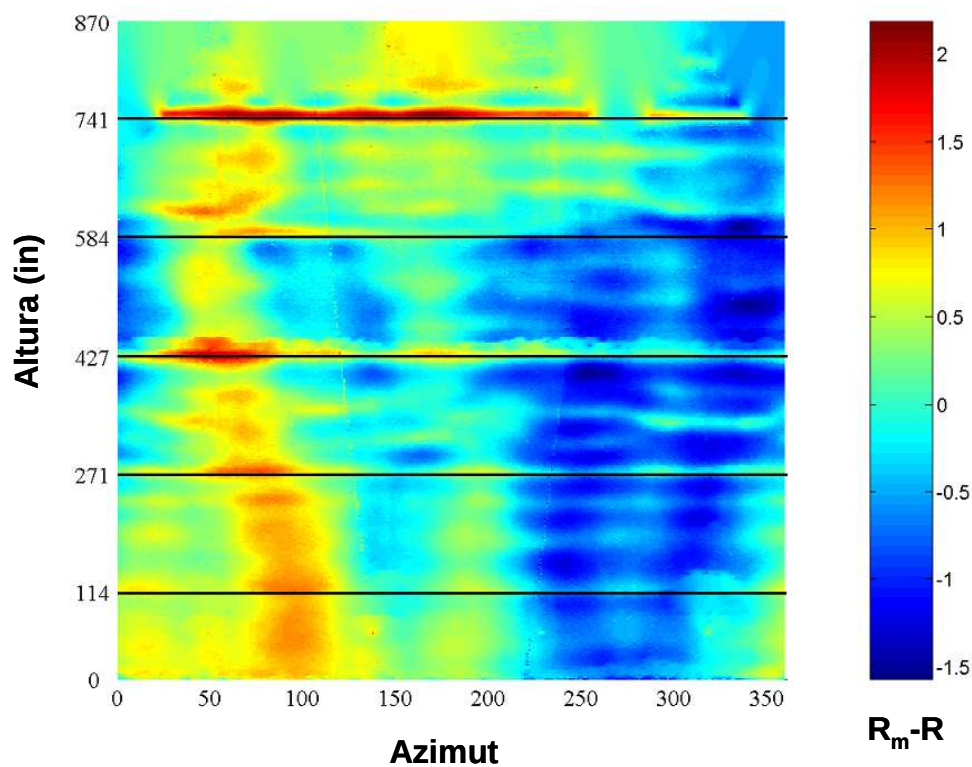


Fig. 12. Distribución de las deformaciones del tambor con respecto al radio medio

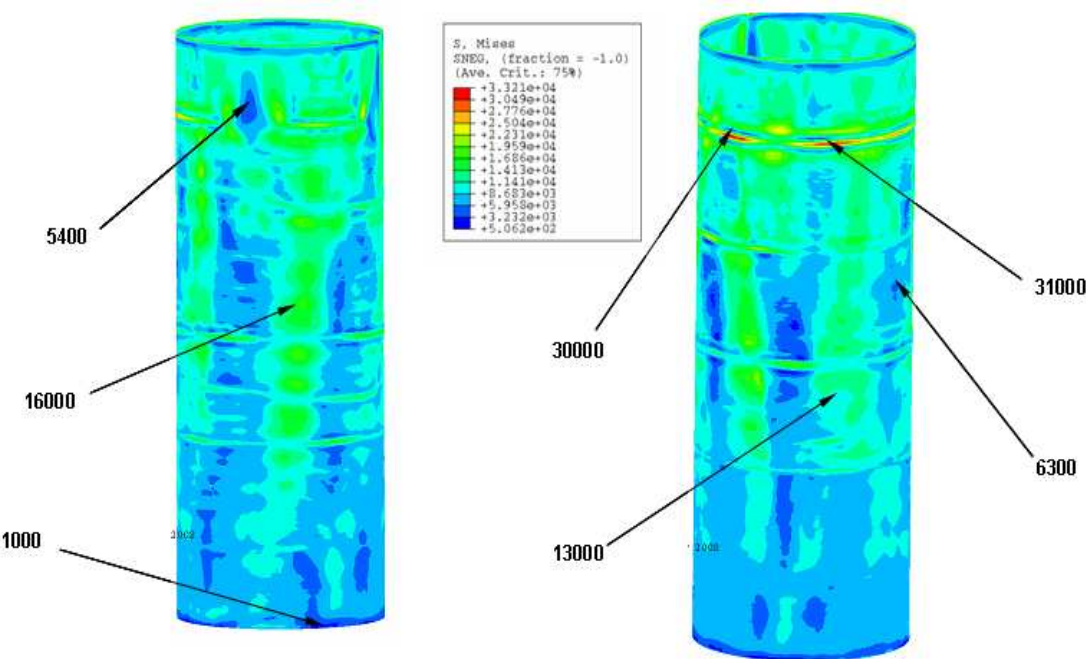


Fig. 13. Distribución de esfuerzos Von Mises máximo en el tambor

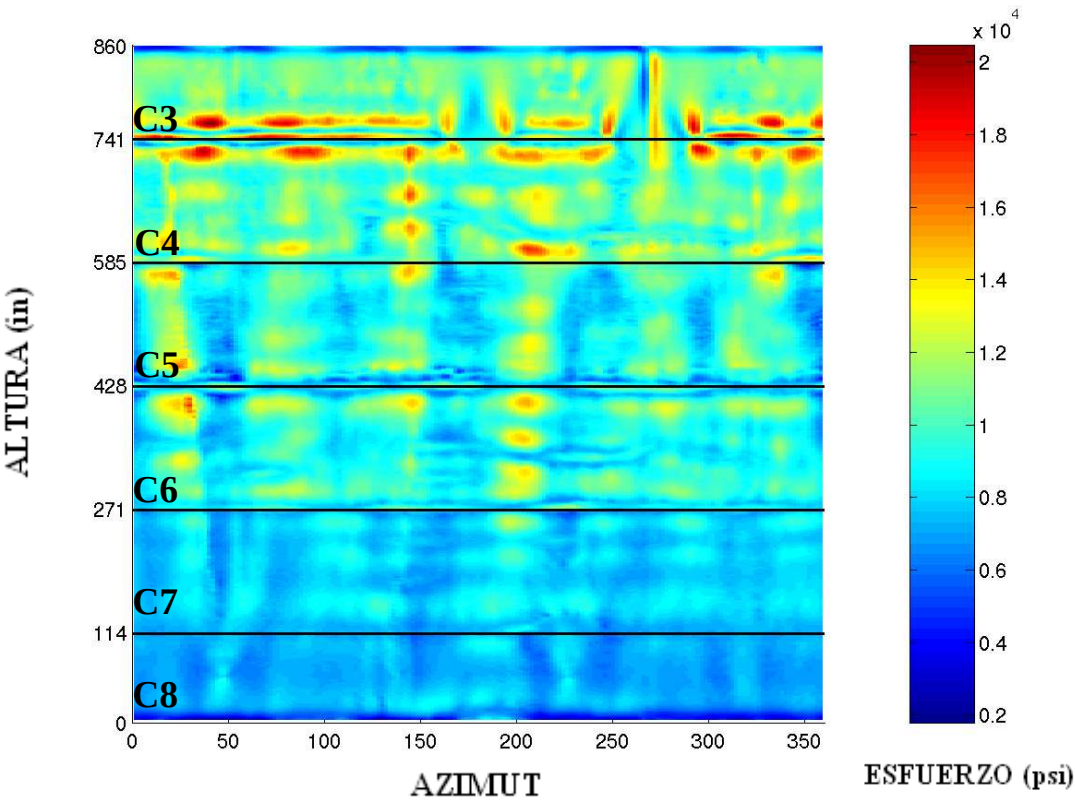


Fig. 14. Distribución de esfuerzos Von Mises promedio en el tambor

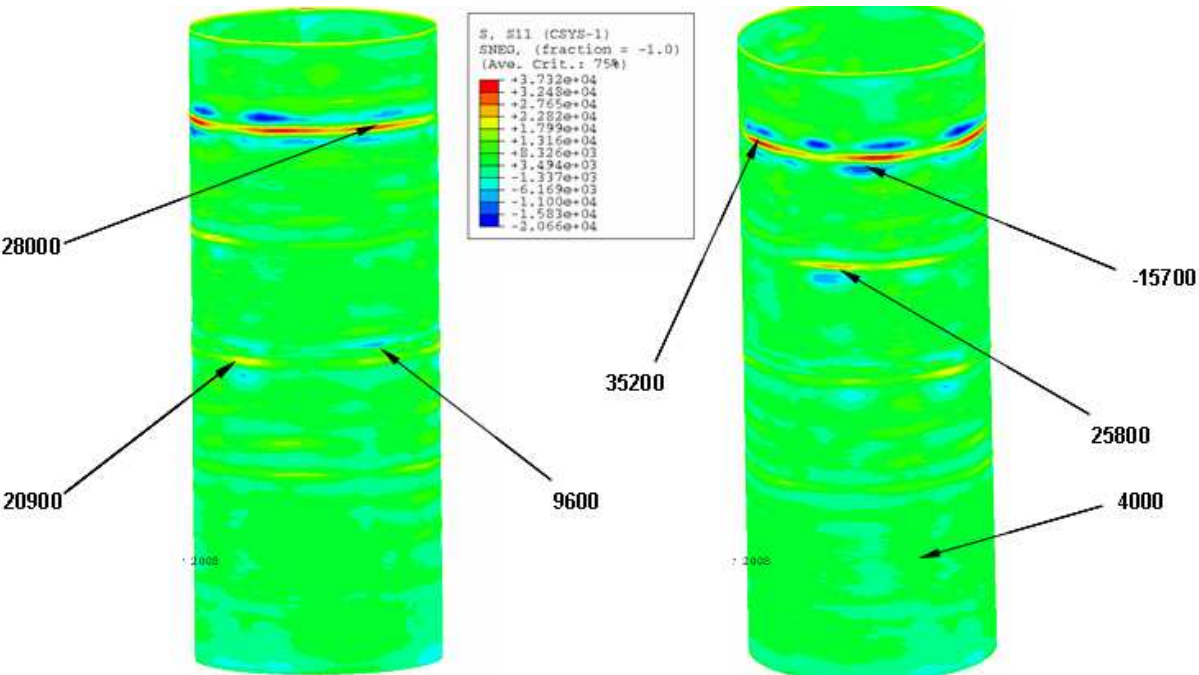


Fig. 15. Distribución de esfuerzos longitudinales máximos en el tambor

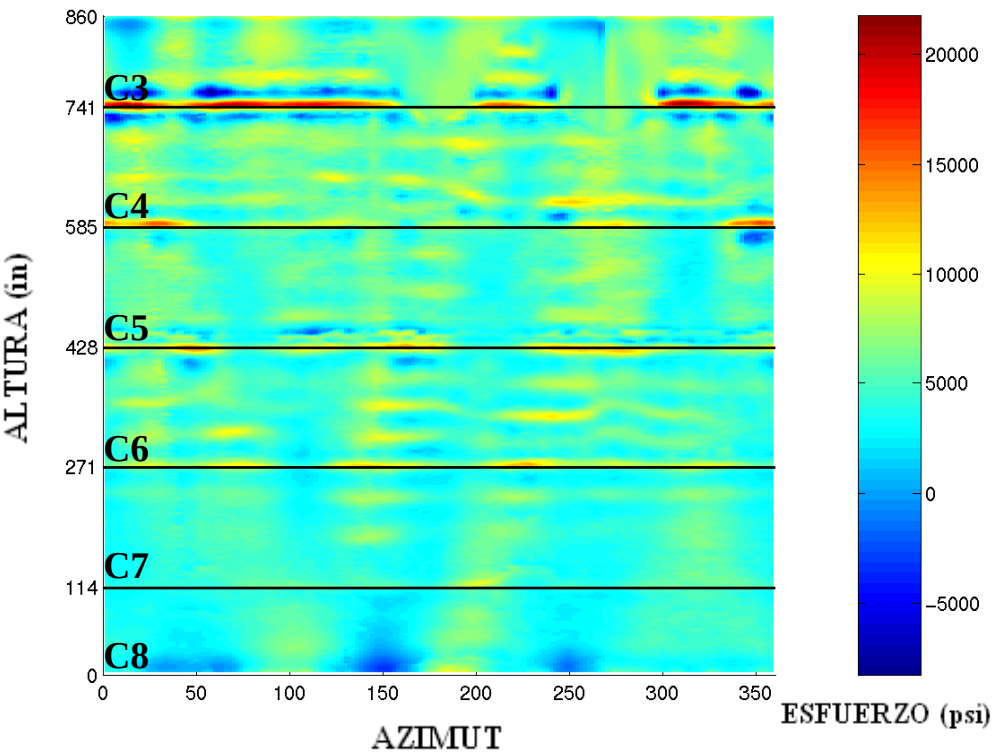


Fig. 16. Distribución de esfuerzos longitudinales promedio en el tambor

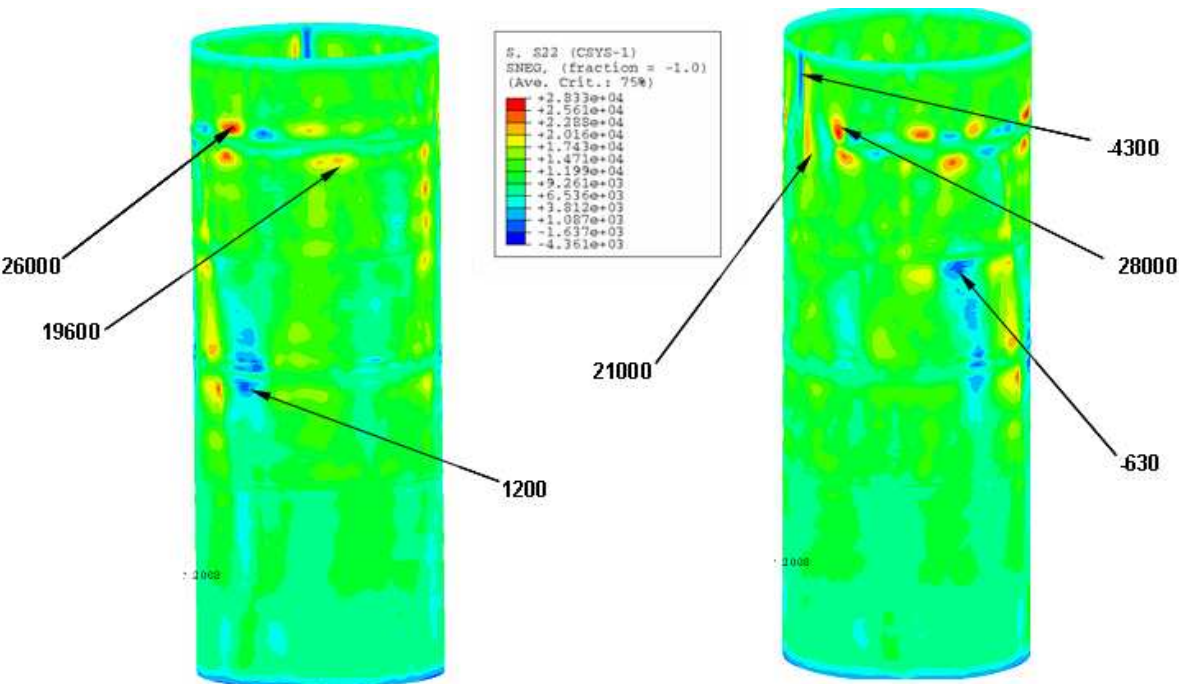


Fig. 17. Distribución de esfuerzos circunferenciales máximos en el tambor

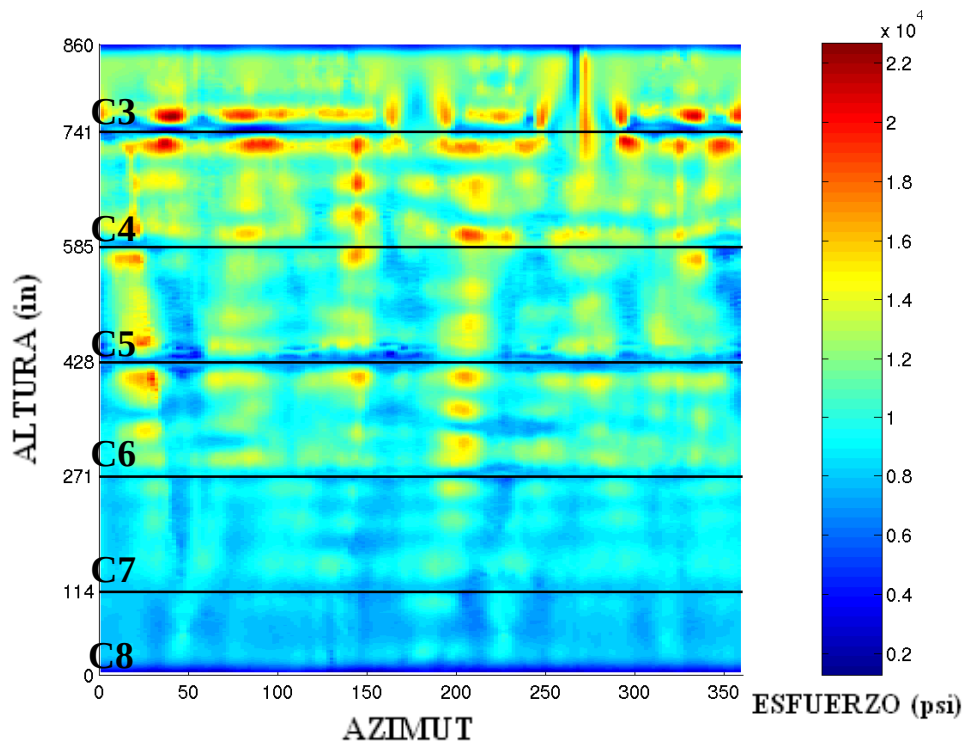


Fig. 18. Distribución de esfuerzos circunferenciales promedio en el tambor