

## **Diagnóstico de la resistencia de las chimeneas de los ciclones del Regenerador D-402**

**Juan Miguel Pichardo-Martínez**

Recibido el 2 de marzo de 2009; aceptado el 27 de mayo de 2009

### **Resumen**

El presente artículo describe el modo en que se han empleado las técnicas de modelación en correspondencia con el método de los Elementos Finitos, para la determinación de los esfuerzos máximos que surgen en la zona de unión entre las chimeneas de los ciclones secundarios y la Cámara Plenum del Regenerador D-402, de la Refinería de Petróleo "Nico López". El conjunto se modeló utilizando el software ABAQUS, donde se aplicaron las cargas críticas que pueden aparecer, en condiciones reales de trabajo.

**Palabras claves:** modelación por elementos finitos, diagnóstico resistencia ciclones, regenerador d-402.

### **Diagnostic of Regenerator D-402 Cyclones Chimneys Resistance.**

#### **Abstract**

The paper describe the way modeling techniques have been employed, according to Finite Elements Analysis, for determining maximum stresses appearing in secondary cyclones chimneys and Plenum Chamber union of D-402 Regenerator, located in "Nico López" Petroleum Refinery. ABAQUS software was applied for modeling. Critical loads taking place on real conditions were simulated.

**Key words:** finite elements analysis, cyclones resistance diagnostics, regenerator d-402

## 1. Introducción.

El Regenerador de Catalizador D-402 se encuentra ubicado en la Planta # 2 de la Refinería de Petróleo “Nico López”, perteneciente a la Unión Cuba Petróleo (CUPET). Este equipo es el encargado de regenerar o devolverle las propiedades al catalizador que se emplea en el reactor de craqueo catalítico. Formando parte de él se encuentran los ciclones secundarios.

Durante inspecciones realizadas, se detectó que varios de estos ciclones presentaban rajaduras en la zona por debajo de la soldadura con la Cámara Plenum (Cabezal soporte de los ciclones secundarios). La presencia de esta falla afectó la integridad estructural del conjunto y se produjeron pérdidas de catalizador que impactaron negativamente en la eficiencia del proceso.

Ante el desconocimiento de las causas que provocaron las rajaduras surge el siguiente problema de investigación: ¿Por qué las chimeneas de los ciclones secundarios del Regenerador D-402, sufren rajaduras en la zona próxima al cordón de soldadura por debajo de la Cámara Plenum?

Para dar respuesta a esta interrogante se decidió determinar los esfuerzos máximos que ocurren en la zona antes señalada. Se llevó a cabo una cuidadosa búsqueda acerca del diseño de la pieza, los materiales empleados y sus características mecánicas. Teniendo en cuenta la geometría de la pieza y lo engorroso que resultaría determinar mediante cálculos manuales los esfuerzos que aparecen en el área bajo estudio se decidió realizar una modelación y emplear el software ABAQUS para estudiar el comportamiento que tendría la estructura bajo condiciones de carga reales.

### Breve descripción del proceso de Craqueo Catalítico.

El craqueo de la materia prima de petróleo en presencia de catalizadores es uno de los principales métodos de producción de los componentes de base de las gasolinas automótiles y Gas-Propano Licuado (GPL). La unidad de craqueo catalítico tiene como fin

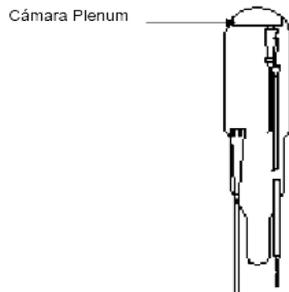
convertir por medio de reacciones catalíticas un producto de alto peso molecular (inyecto) en otros de menores pesos. El inyecto no es más que el diesel pesado procedente de la torre de destilación al vacío, en ocasiones combinado con el Diesel obtenido en la destilación atmosférica. El catalizador zeolítico (microesférico) modifica el mecanismo de ruptura de los enlaces entre átomos de carbono y aumenta la velocidad de transformación. De esta manera se reduce la severidad de operación y se obtiene mayor cantidad de componentes ligeros como las naftas y el GPL [3].

El Regenerador D-402 es el encargado de restaurar la actividad del catalizador, perdida durante la etapa de reacción de craqueo por la deposición de coque sobre este último. La eliminación del coque y los restos de hidrocarburos se hace por combustión. Esto provoca que existan elevadas temperaturas dentro del equipo. Los gases de combustión pasan a través de los ciclones a la Cámara Plenum y finalmente a la atmósfera a través de la chimenea. Estos gases con catalizador entran en los ciclones primarios y posteriormente en los secundarios donde se realiza la última etapa de separación de las partículas antes de salir del equipo. El catalizador es separado por acción centrífuga en ambas etapas y es devuelto al interior a través de tubos verticales llamados bajantes. En los extremos de estos se encuentran las válvulas trickles.

Los gases de los ciclones secundarios pasan a la Cámara Plenum y posteriormente a la chimenea. La caída de presión en los ciclones no debe ser mayor de 10 608 Pa.

### Principales componentes del Regenerador D-402 implicados en la modelación.

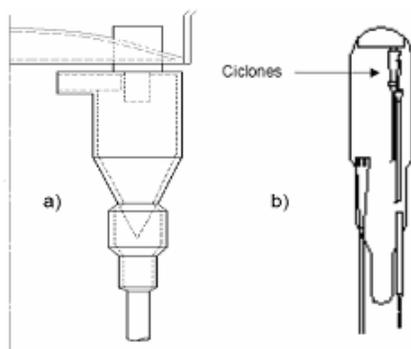
**Cámara Plenum:** A ella están conectados los ciclones secundarios. Los gases de combustión pasan a través de los ciclones a la Cámara Plenum y finalmente a la atmósfera a través de la chimenea. Trabaja a temperaturas de hasta 727°C y presión de hasta 0,21 MPa. El material de fabricación es acero inoxidable ASTM A-240 tipo 304. Se ubica en la parte superior del regenerador (Figura 1).



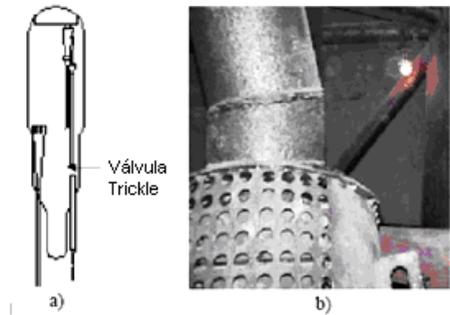
**Figura 1.** Cámara Plenum.

**Ciclones:** Su función es separar la mayor parte de catalizador regenerado de los gases de combustión mediante la acción de la fuerza centrífuga. Trabajan a elevada temperatura (hasta 727°C), presión (hasta 0,21MPa). Sufren erosión por la acción del catalizador. El material de fabricación es acero ASTM A-240 tipo 304. En su interior están recubiertos por material refractario. Los ciclones se encuentran ubicados en la parte superior del regenerador debajo de la Cámara Plenum (Figura 2). Entre las fallas que presentan se encuentra la presencia de agrietamiento en la zona cercana a la soldadura con la Cámara Plenum.

**Válvulas Trickle:** Tienen como función evacuar el catalizador que se separa en los ciclones. Mantienen un nivel apropiado del mismo, evitando la inundación de los ciclones y la circulación de gases a través de ellas. Trabajan a elevada temperatura (hasta 727 °C) y con presiones hasta 0,08 MPa. El material de fabricación es acero ASTM A-240 tipo 304. Se encuentran ubicadas en el extremo inferior de las patas de los ciclones (figura 3).



**Figura 2.** a) Ciclón secundario. b) Ubicación de Ciclón Secundario.



**Figura 3.** a) Ubicación de Válvula Trickle. b) Válvula Trickle.

### **Análisis por el método de los Elementos Finitos.**

La técnica de análisis por elementos finitos (AEF) consiste en el empleo de los métodos numéricos en la resolución de un problema físico determinado. Este método numérico se basa en dividir la geometría en la que se quiere resolver un problema físico, en pequeños elementos en los cuales se resuelven las ecuaciones diferenciales correspondientes a un campo (la temperatura en transmisión del calor, el campo magnético en electromagnetismo, el campo de velocidades en Mecánica de fluidos, etc.), en forma discreta, teniendo en cuenta las propiedades físicas de los materiales empleados, los elementos del entorno de vecindad, las condiciones de contorno y las fuentes generadoras de campo. La resolución de estas ecuaciones de forma discreta se realiza de forma iterativa hasta que se alcanza convergencia en la solución.

La herramienta (*software*) que permite realizar este proceso de forma eficiente y cómoda se denomina herramientas de análisis por elementos finitos, o simplemente herramienta de elementos finitos (HEF) [4].

En la búsqueda de la solución, los pasos que se siguieron fueron:

### **Definición de la geometría del ciclón.**

Para la definición de la geometría se hizo un estudio pormenorizado de los planos correspondientes al equipo Regenerador D-402. Esto permitió realizar las simplificaciones pertinentes al modelo a analizar. Se modeló la geometría de un Ciclón Secundario y la Cámara Plenum, y se descartó la del resto de los componentes del equipo pero se tuvo en cuenta

las cargas que generan sus respectivos pesos sobre las piezas modeladas [2].

A continuación se desglosan los pesos de las piezas que no se modelaron:

| Pieza no modelada.  | Peso. (kg) |
|---|------------|
| Bajantes primarios<br>(MKA, MKB Ø16" sched.40 pipe c.s)       | 21282.6    |
| Bajantes secundarios<br>(MKC, MKD Ø6" sched 80 pipe c.s)      | 3427.8     |
| Válvula <i>Trickle</i> secundaria Ø10"                        | 160.6      |
| Válvula <i>Trickle</i> primaria Ø16"                          | 300.5      |
| Nivel 1 de<br>Tranques de bajantes primarios<br>y Secundarios | 1473.4     |
| Nivel 2 de<br>Tranques de bajantes primarios                  | 8913.8     |
| Porción del ciclón secundario<br>que no fue modelada          | 522.8      |
| Ciclón Primario   | 1297.0     |

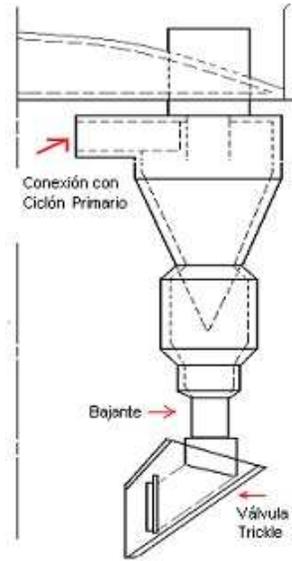
En la Figura 4 se muestra el esquema del Ciclón Secundario con su Bajante y Válvula *Trickle* de diámetro 10". Solo se modeló la parte del ciclón que queda por encima de la primera sección cónica de arriba hacia abajo.

**Condiciones de contorno y cargas críticas reales.**

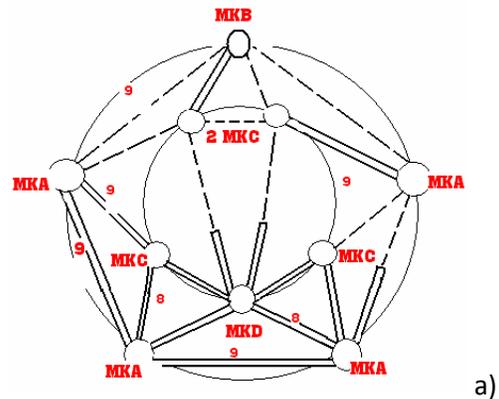
Se calcularon las cargas que actúan sobre la porción modelada. Se consideró la sumatoria de los pesos desde la primera sección cónica del ciclón secundario hacia abajo, lo que incluye la décima parte del peso de los tranques de los bajantes primarios y secundarios del Nivel 1 (Figura 5 a), y la quinta parte de los tranques de los bajantes primarios del Nivel 2 (Figura 5 b). Además, se consideró el peso que ejerce un ciclón primario sobre la unión con el ciclón secundario en el caso de que el ciclón primario se desplace de su posición original y descienda en la dirección vertical de su eje. Para la determinación de las cargas se multiplicaron los pesos correspondientes por el valor de la aceleración de la gravedad. Esto permitió colocar cargas distribuidas en el extremo cilíndrico inferior del ciclón y en el conducto rectangular de la unión con el ciclón primario.

En cuanto a la Cámara Plenum, se empotró el cabezal elíptico en sus extremos. Para ello se

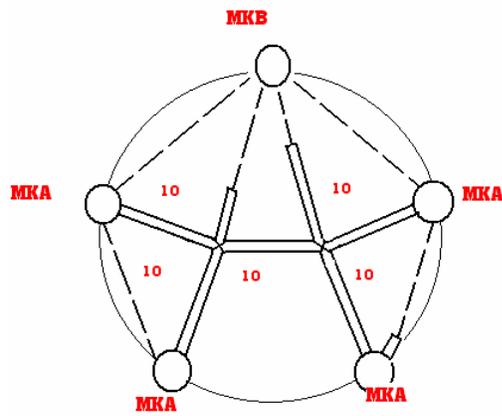
eliminaron todos los grados de libertad de los nodos que se encontraban en la periferia.



**Figura 4.** Esquema del Ciclón Secundario con Bajante y Válvula *Trickle*.



a)

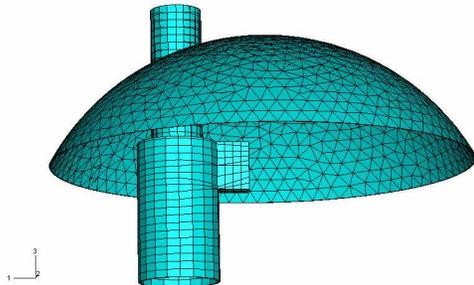


b)

**Figura 5.** Tranques entre bajantes de ciclones primarios y secundarios a) Nivel 1. b) Nivel 2.

**Mallado de la geometría.**

Las herramientas de elementos finitos permiten realizar mallados automáticos y a la vez dan la posibilidad de que el usuario malle de forma más fina las zonas en que considere necesario lograr una mayor precisión en el resultado. En este caso se malló en la forma automática y posteriormente se fue afinando el mallado hasta lograr los resultados deseados. La Figura 6 muestra el mallado obtenido.

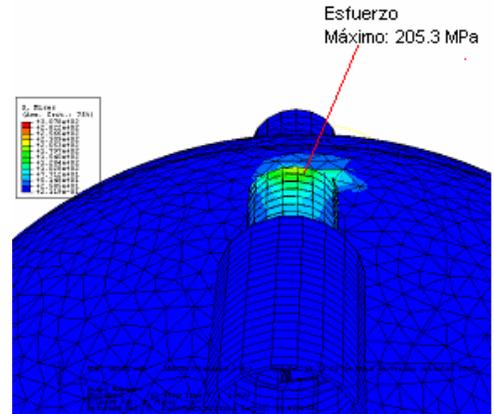


**Figura 6.** Mallado del Modelo.

**Resolución del problema.**

En esta fase del proceso, se aplicó el método de análisis por elementos finitos utilizando el software ABAQUS, lo cual permitió obtener la solución del problema físico de forma iterativa. Se asumió que el material mantenía un comportamiento lineal en todo momento.

Aplicadas las cargas y consideradas las condiciones de contorno se realizó la corrida del programa y se obtuvieron los resultados que se muestran en la figura 7.



**Figura 7.** Esfuerzos resultantes según Von Mises.

**Análisis de la solución teniendo en cuenta el régimen de trabajo del equipo y las propiedades mecánicas del material de construcción.**

Una vez realizada la corrida del modelo, se procedió a analizar los resultados obtenidos. El principal factor que se tuvo en cuenta fue el esfuerzo máximo admisible del material de la pieza y la forma en que varía el mismo con la fluctuación de la temperatura de trabajo. En la Tabla 1 se exponen las propiedades mecánicas del acero de construcción de las chimeneas de los ciclones secundarios a diferentes temperaturas. Después de determinar el esfuerzo máximo resultante es posible conocer si la pieza resiste o no las condiciones de carga impuestas.

**Tabla No. 1.** Propiedades mecánicas del acero inoxidable ASTM A - 240 Tp 304 a diferentes temperaturas [1]

| Test Temperature |      | 0.2% Yield Strength |       | Tensile Strength |       | Elongation<br>Percent in<br>2" or<br>51 mm |
|------------------|------|---------------------|-------|------------------|-------|--|
| °F               | °C   | psi                 | (MPa) | psi              | (MPa) |  |
| -423             | -253 | 100,000             | 690   | 250,000          | 1725  | 25   |
| -320             | -196 | 70,000              | 485   | 230,000          | 1585  | 35   |
| -100             | -79  | 50,000              | 354   | 150,000          | 1035  | 50   |
| 70               | 21   | 35,000              | 240   | 90,000           | 620   | 60   |
| 400              | 205  | 23,000              | 160   | 70,000           | 485   | 50   |
| 800              | 427  | 19,000              | 130   | 66,000           | 455   | 43   |
| 1200             | 650  | 15,500              | 105   | 48,000           | 330   | 34   |
| 1500             | 815  | 13,000              | 90    | 23,000           | 160   | 46   |

El esfuerzo máximo resultante se localizó en la zona próxima al cordón de soldadura por debajo del cabezal elíptico, coincidiendo con el área

donde se producen las grietas. Haciendo una interpolación de los datos que ofrece la tabla anterior se puede apreciar que a la temperatura

de trabajo por diseño (727 oC), el esfuerzo máximo admisible del material es 251 MPa. Esto demuestra que aun en este caso, la pieza debe soportar la carga crítica impuesta. Sin embargo, en el expediente del equipo se registran temperaturas de trabajo entre 850-900 oC que se produjeron ocasionalmente por problemas operacionales. Si se observa nuevamente la Tabla 1, se puede ver que a 815 oC el esfuerzo admisible del material baja hasta 160 MPa, lo cual se encuentra muy por debajo del esfuerzo máximo que se produce bajo condiciones de carga críticas (205.3 MPa). Por lo que todo indica que las rajaduras de las chimeneas de los ciclones han ocurrido como consecuencia de problemas operacionales de la planta que han elevado la temperatura de trabajo por encima del rango establecido por diseño y al desplazamiento de los ciclones primarios de su posición original lo cual ha provocado la generación de cargas adicionales sobre los ciclones secundarios.

Finalmente la temperatura de trabajo nunca se deberá elevar por encima de los 775 oC. Pues si están dadas las condiciones de carga críticas (esfuerzo 205.3 MPa), las chimeneas de los ciclones secundarios sufrirán agrietamiento.

## 2. Conclusiones.

1. La realización de este estudio permitió predecir el comportamiento real de la estructura analizada en condiciones de carga crítica y el efecto que tiene la variable temperatura sobre su resistencia.

### Ing. Juan Miguel Pichardo-Martínez

Especialista en inspección y diagnóstico de equipos estáticos.

Empresa de Mantenimiento del Petróleo - EMPET. La Habana. Cuba

Teléfono: (537) 794-4840. Fax: (537) 797-7767

E-mail: [juanpichardo2005@yahoo.com](mailto:juanpichardo2005@yahoo.com)

2. Se comprobó que los esfuerzos máximos se producen en la zona donde aparecen las rajaduras.
3. Se sentó un precedente para el empleo del método de los elementos finitos como herramienta para el diagnóstico en esta instalación lo que contribuirá a eliminar progresivamente la incertidumbre y el desconocimiento que existe acerca del porqué fallan las piezas de los sistemas críticos.

## 3. Referencias.

1. **Alloy 304.** Chromium - Nickel (UNS S30400). General Properties, Sandmeyer Steel Company. Disponible en: <http://www.sandmeyersteel.com/304.html>
2. Arrangement of regenerator cyclones, S-21643-1D. Arthur G. McKee and company, 1956. Biblioteca "Mártires de la Revolución", Refinería "Ñico López"
3. **CÁMBARA GÁLVEZ, W.** La aplicación de los ensayos no destructivos en las paradas de planta de la Refinería de Petróleo "Ñico López". Tutor: Flores Díaz, N. Trabajo de diploma, CEIM. Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" - ISPJAE, La Habana. 2005.
4. **ESCRIBANO RÓDENAS, M.** El análisis por Elementos Finitos: Una metodología muy reciente en Economía [Consultado el: 18 Jul. 2007]. Disponible en: <http://www.uv.es:80/asepuma/XIV/comunica/117.pdf>