

Simulación termomecánica del plenum superior del reactor de lecho fluidizado R-10 de la empresa Orinoco Iron C.A.

Upper plenum thermomechanical simulation of the Orinoco Iron Company C.A. fluidized bed reactor R-10

Gutiérrez, Edgar y Zavala, José

Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre".

Vicerrectorado Puerto Ordaz. Departamento de Ingeniería Mecánica.

Centro de Estudios Energéticos. Puerto Ordaz 78, Venezuela

edgar010170@movistar.net.ve

Recibido: 13-03-2007

Revisado: 09-10-2007

Resumen

En éste trabajo se presenta la simulación termomecánica del plenum superior del reactor de lecho fluidizado R-10 de la empresa Orinoco Iron, C.A. El plenum es la estructura que soporta los ciclones, y en la actualidad está presentando deformaciones excesivas y rotura en algunas partes de las uniones soldadas. La simulación consistió en determinar los esfuerzos mecánicos y la deformación de la estructura, mediante elementos finitos, para cada una de las cargas que actúan sobre el plenum; tales como: temperatura, carga de cuerpo y peso de los ciclones, peso del mineral acumulado en los ciclones cuando se obstruyen y fuerza aplicada por la válvula de cierre de los ciclones. Los resultados permitieron determinar el grado de influencia de cada una de las cargas en la falla del plenum, destacándose que la temperatura es responsable del 99% de la deformación y la obstrucción de los ciclones es responsable del 89,5 % del esfuerzo.

Palabras claves: Simulación, termomecánica, plenum, reactor, ciclones, Orinoco Iron.

Abstract

This work shows the upper plenum thermomechanical simulation of the fluidized bed reactor R-10 of the Orinoco Iron Company. The plenum is the structure that supports cyclones. The simulation consisted on determining plenum mechanical stresses and deformations by applying finite element methods, for each actuating load; those are, temperature, body load and cyclones weight, cyclones accumulated mineral weight when they are obstructed and forces caused by cyclones closing valve. The results show the influence of each load on plenum failure, revealing that temperature is responsible for 99% of the deformation and cyclones obstruction is responsible for 89,5% of the stress.

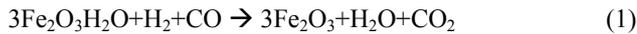
Key words: Simulation, thermomechanical, plenum, reactor, cyclones, Orinoco Iron.

1 Introducción

La empresa Orinoco Iron, C.A. se encarga de producir briqueta mediante el proceso de reducción directa llamado FINMET (Finos Metalizados), el cual surge de una mejora del proceso FIOR (patente de FIOR de Venezuela). El proceso consiste en hacer pasar un gas rico en H₂ y CO a través de cuatro (4) reactores conectados en series. El gas entra al primer reactor (R-10) a 850 °C aproximadamente y fluye hacia arriba (Fig. 1) en contracorriente con el flujo de mineral de hierro que baja por gravedad desde el reactor (R-40)

hacia los demás reactores. A medida que el hierro desciende entra en contacto con el gas a mayor temperatura lo cual aumenta el poder reductor, alcanzando su máximo en el reactor R-10.

En el reactor R-40 se inicia el proceso de reducción con la eliminación del agua de cristalización que posee el mineral de hierro. Se puede decir que este reactor actúa como secador ya que el proceso de reducción es mínimo. La reacción ocurre aproximadamente a 450 °C y se representa por la siguiente ecuación química:



En el reactor R-30 toda la hematita se reduce a magnetita, en un proceso que ocurre a aproximadamente 641 °C y se representa por la siguiente ecuación:

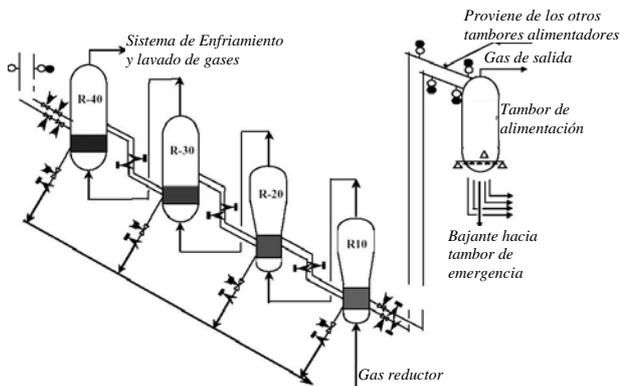
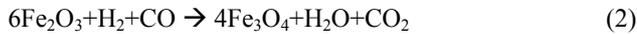
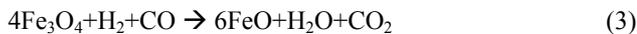
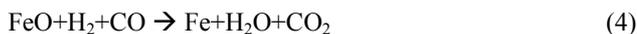


Fig. 1. Disposición de los reactores de lecho fluidizado.

En el reactor R-20 se reduce la magnetita a wustita a una temperatura de 730 °C aprox., en un proceso que es representado por la ecuación (3):



Finalmente en el reactor R-10 se reduce la wustita a hierro en un proceso que ocurra a aproximadamente a 790 °C. Éste proceso está dado por:



Se puede notar que el reactor R-10 es el que está sometido a la mayor temperatura de operación y es donde se culmina el proceso de reducción, en consecuencia, es en éste donde se presenta problemas de deformación excesiva de plenum y rotura en algunas partes de las uniones soldadas.

La Fig. 2 muestra algunos de los problemas presentados en el reactor R-10 (Zavala, 2005), tal es el caso de acumulación de material sobre el plenum (Fig. 2.a), doblado de vástago de la válvula de cierre (Fig. 2.b), rotura de las uniones soldadas, lo que trae como consecuencia desprendimiento en cartela del plenum (Fig. 2.c) y grietas en la falda del plenum (Fig. 2.d), entre otras.

En éste trabajo se presenta la simulación numérica del plenum, utilizando el método de los elementos finitos, con la finalidad de determinar las causas más probables que generan la falla mecánica del mismo. En ese sentido, se realiza la simulación del plenum para determinar su comportamiento bajo la acción de cada una de las cargas que actúan sobre éste, en forma individual. Luego se compara cada resultado con la simulación del plenum bajo la acción de todas las cargas. Esto nos permitirá determinar la influencia de cada



Fig. 2. Algunas fallas presentadas en el reactor R-10.

una de las cargas en cuanto al esfuerzo y la deformación del plenum.

2 Descripción de los reactores R-10

El reactor R-10 es último reactor en el proceso de reducción de hierro y tiene la forma de la Fig. 3, es decir, la parte superior está formada por un cilindro de diámetro 6,9 m que converge mediante un cono a un cilindro de diámetro 5,1 m. La estructura del reactor es de acero al carbón, en cuyo interior posee un pared de refractario resistente a la temperatura y la abrasión.

Dentro del reactor hay cuatro ciclones, los cuales se encargan de separar el polvo del gas reductor antes de que éste salga del reactor. Los finos separados en los ciclones descargan dentro del lecho fluidizado a través de sus piernas (parte inferior), las cuales poseen en la parte inferior, una placa deflectora de forma cónica, llamada sombrero chino, que se encarga de evitar la entrada del gas por ésta vía.

El plenum es la placa metálica reforzada en forma de casquete esférico Fig. 3, que se encarga de sostener los ciclones; en tal sentido, es una de los elementos del reactor sometido a mayor esfuerzo mecánico.

3 Metodología de la simulación

La simulación termomecánica se dividió en tres etapas, que son:

- Modelo matemático.
- Estudio de convergencia.
- Solución para cada condición de carga.

3.1. Modelo matemático

Para resolver éste problema, se considera que el ple-

num no debe sobrepasar el límite elástico del material (condición de diseño), en ese sentido, se resuelven las ecuaciones de equilibrio considerando que el material tiene un comportamiento lineal.

La deformación total (Timoshenko, 1951) se calcula mediante la Ec. (5):

$$\varepsilon = \varepsilon^t + D^{-1}\sigma \tag{5}$$

donde:

ε , es la deformación total.

ε^t , deformación térmica.

$$\varepsilon^t = (T - T_0) [\alpha_x \ \alpha_y \ \alpha_z \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$, coeficientes de dilatación térmica.

T_0 , temperatura de referencia.

T , distribución de temperatura en el plenum.

D , matriz de rigidez

$$D^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & -\frac{\nu_{xz}}{E_x} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{yx}}{E_y} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & -\frac{\nu_{zy}}{E_z} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xx}} \end{bmatrix}$$

E_x, E_y, E_z , módulo de Young en cada dirección.

$\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz}$, Coeficientes de Poisson.

G_{xy}, G_{yz}, G_{xz} , Módulo de corte o torsión.

σ , tensor de esfuerzo

Las propiedades del acero se obtienen del Handbook of Stainless Steel (Pecker, 1977).

La Fig. 4 muestra la forma tridimensional del dominio matemático donde se resuelven las ecuaciones de equilibrio, y esta formado por el plenum y la falda que lo sostiene.

Se puede destacar que geoméricamente el dominio tiene dos planos de simetría perpendiculares; sin embargo, como se quiere simular el efecto de que uno o más ciclones se tapen, se pierde la simetría al incorporar las cargas.

Las condiciones de borde que se incorporan son:

- La parte superior de la falda se le restringe el movimiento vertical pero se deja libre el movimiento radial (ver Fig. 4).
- La carga debida al peso de los ciclones y del material que se acumula dentro de éstos, cuando éstos se tapan, se incorporan como carga por unidad de longitud en la línea de apoyo de los ciclones (Ver Fig. 4).

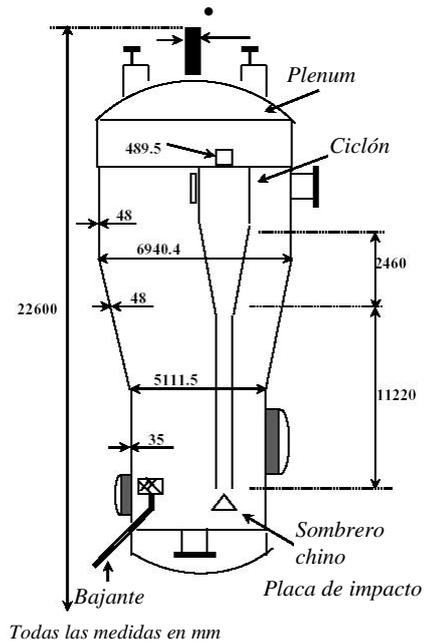


Fig. 3. Esquema físico del reactor R-10.

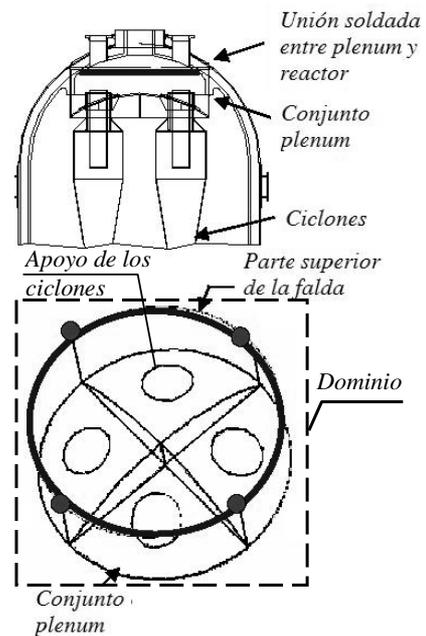


Figura 4. Dominio matemático.

- El peso del material acumulado sobre el plenum se incorpora como carga superficial.
- El peso del plenum y de la falda se incorpora como carga de cuerpo.
- Fuerza de la válvula de cierre del ciclón, SOV, sobre el plenum.
- Para la carga térmica se considera una temperatura de referencia de 27 °C, que es la temperatura a la cual se reali-

za el montaje de la estructura. Por otra parte, el plenum mantiene una temperatura uniforme de aproximadamente 800 °C cuando el reactor R-10 esta en operación normal.

Las magnitudes de las cargas que actúan sobre el plenum se muestran en la Tabla 1.

Para resolver el problema se utilizó el software comercial ANSYS, y elemento finito con que se construyó el modelo fue del tipo tetraedro de primer orden.

Tabla 1. Cargas aplicadas al plenum

Tipo de carga	Unidad	Magnitud
Carga de cuerpo (densidad)	kg/m ³	7.850,0
Peso estructural de cada ciclón	N	58.800,0
Material que obstruye cada ciclones	N	148.933,3
Fuerza de la válvula sobre plenum	N	14.427,5
Material acumulado sobre el plenum	N	46.723,7
Carga térmica	°C	800,0

3.2. Estudio de convergencia

Para realizar el estudio de convergencia (Becker, et al, 1981) se resolvió el problema termomecánico para modelos de elementos finitos con diferente grado de refinamiento de malla y aplicando la condición de carga de diseño del plenum, compuesta por: carga de cuerpo, peso de los ciclones y carga térmica (total de caga actuantes sobre los reactores sin incluir el efecto de obstrucción de los ciclones).

El error o norma infinita para el esfuerzo (Ec. 6) y la deformación (Ec. 7) son respectivamente las siguientes:

$$e_{\sigma} = \left| \frac{\sigma^{N+1} - \sigma^N}{\sigma^{N+1}} \right| \times 100 \tag{6}$$

$$e_{\epsilon} = \left| \frac{\epsilon^{N+1} - \epsilon^N}{\epsilon^{N+1}} \right| \times 100 \tag{7}$$

donde N+1 es un grado de refinamiento superior a N.

Los resultados del estudio de convergencia se muestran en la (Fig. 5), la cual permite seleccionar la malla de elementos finitos de 94.641 nodos y 46.073 elementos tipo tetraédrico (Fig. 6), cuyo error porcentual basado en el esfuerzo es de 3,97 % y el error porcentual basada en la deformación es de 0,01%.

3.3. Solución para cada condición de carga

El modelo de elemento finito se resuelve para las condiciones de carga mostrada en la Tabla 2.

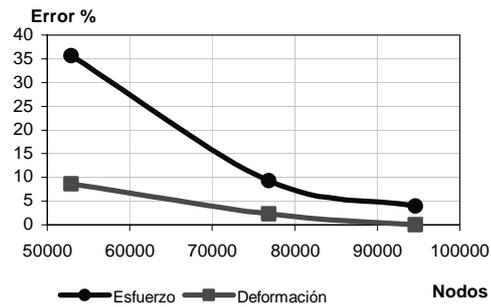


Figura 5. Curva de convergencia el MEF.

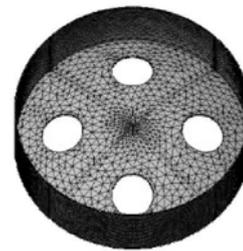


Fig. 6. Modelo de elementos finitos utilizado para la simulación.

Tabla 2. Condiciones de carga utilizada para la simulación

Condi- ción de carga	Cargas aplicadas
1	Carga de cuerpo. Peso estructural de los ciclones.
2	Carga de cuerpo. Peso estructural de los ciclones. Peso del material de obstrucción (2 ciclones).
3	Carga de cuerpo. Peso estructural de los ciclones. Peso del material acumulado sobre el plenum.
4	Carga de cuerpo. Peso estructural de los ciclones. Fuerza de la válvula SOV debido
5	Carga de cuerpo. Peso estructural de los ciclones. Carga térmica.
6	Todas las carga con dos ciclones obstruidos.

4 . Resultados

A continuación se muestran los resultados para de las condiciones de carga más importantes en cuando a la magnitud de los esfuerzos y el desplazamiento, estas son las condiciones de carga tipo 2, 5, y 6.

La Fig. 7 muestra la distribución de esfuerzo y el desplazamiento para la condición de carga tipo 2, donde se destaca que el desplazamiento máximo es de 0,96 mm y el esfuerzo equivalente máximo es de 123,48 MPa.

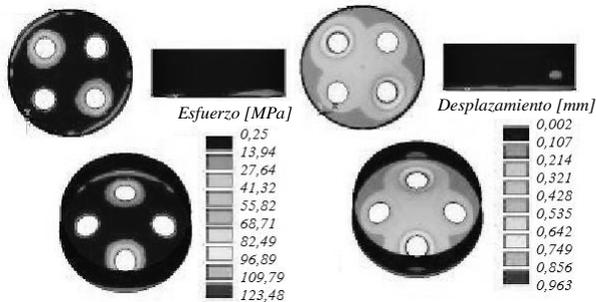


Fig. 7. Esfuerzo y deformación para la condición de carga tipo 2.

La Fig. 8 presenta la distribución de esfuerzo y el desplazamiento para la condición de carga tipo 5, donde se obtiene que el máximo esfuerzo equivalente es de 22,75 MPa y el desplazamiento máximo es de 32,22 mm.

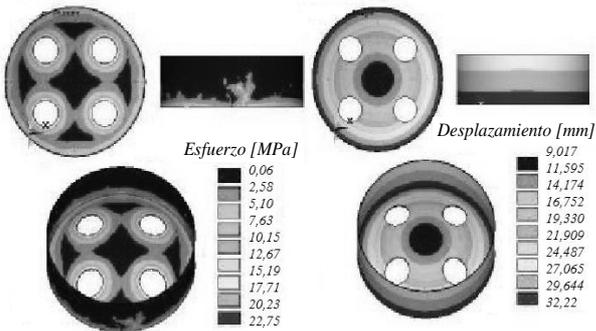


Fig. 8. Esfuerzo y deformación para la condición de carga tipo 5.

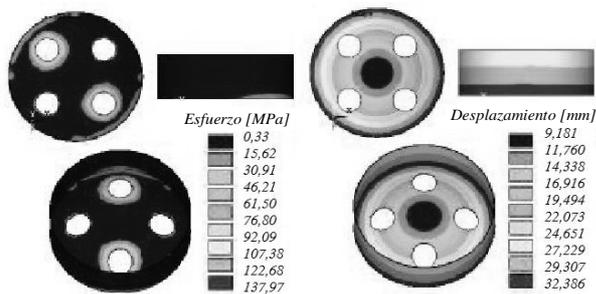


Fig. 9. Esfuerzo y deformación para la condición de carga tipo 6.

La Fig. 9 presenta la distribución de esfuerzos y el desplazamiento bajo la condición de carga tipo 6 (todas las cargas), donde se puede observar que el esfuerzo equivalente máximo es de 137,97 MPa y el desplazamiento máxima es de 32,4035 mm.

Al estudiar el efecto de la carga debido al peso del fino

que se acumula dentro del ciclón cuando éste se tapa, se nota que esta es causante del 89,5 % del esfuerzo mecánico y mientras que la carga térmica es la causante del 99% de la deformación. Por otra parte, se nota que los esfuerzos máximos ocurren en la zona donde se apoyan los ciclones y en la falda del plenum (parte inferior), coincidiendo con la zona donde ocurren las fallas.

Se puede observar que las fallas presentadas en el plenum son consecuencia de los esfuerzo de fatiga por fluctuación de la temperatura, afirmación que se valida con las teorías de Goodman y Soderberg (J. Shigley y C. Mischke, 1990).

El factor de seguridad basado en la teoría de fatiga de Goodman se calcula mediante la ecuación (8), mientras que el factor de seguridad basada en la teoría de Soderberg se calcula por la ecuación (9).

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{N} \quad (8)$$

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{yt}} = \frac{1}{N} \quad (9)$$

Aquí σ_a es el esfuerzo alternante, σ_m es el esfuerzo medio, S_{ut} es la resistencia de rotura a la tensión, S_{yt} es la resistencia de fluencia a la tensión y S_e es la resistencia a la fatiga.

Al sustituir los valores numéricos en las ecuaciones (8) y (9) se obtiene que el factor de seguridad utilizando la teoría de Goodman es de 0,54 y utilizando la teoría de Soderberg es de 0,46, lo cual hace evidente la falla por fatiga del plenum, donde la mayor influencia la realiza la fluctuación de temperatura. Para éste cálculo se ha considerado que

$$\sigma_a = \sigma_m = \sigma_{\max} / 2.$$

5 Conclusiones

- Los esfuerzos máximos se obtienen en la zona de apoyo de los ciclones y en la falda del plenum (parte interior), alcanzando un valor máximo de 138 MPa.
- El peso del fino acumulado en los ciclones (dos de los cuatro) como consecuencia de la obstrucción de éstos, es causante del 89,5 % del esfuerzo mecánico total que actúa en el plenum.
- La carga térmica es la causante del 99% de la deformación total producida en el plenum.
- Las fallas ocurridas en el plenum son consecuencia de la fatiga del material, lo cual se demuestra con las teorías de Goodman y Soderberg.
- Para mejorar el desempeño del plenum se debe aumentar la longitud de la falda y los refuerzos transversales a 200 mm al igual sustituir el material de acero 304-H a 309-H, dado que éste último presenta mejor desempeño bajo carga de fatiga térmica. Se estima que la vida del plenum se incremente de 20.000 horas a 100.000 horas.

6 Agradecimiento

Agradecemos al Centro de Estudios Energético (CEE) por su apoyo computacional y la licencia del software comercial ANSYS en el desarrollo de éste trabajo.

Referencias

Becker EB, Carey GF. y Oden T, 1981, Finite elements an intruduction, Volumen I, Prentice-Hall, Inc, New Jersey, USA.

Pecker y Bernsteing, 1977, Handbook of stainless steel, McGraw Hill Book Company, USA.

Shigley JE y Mischke CR., 1990, Diseño en ingeniería mecánica, Mc Graw Hill, quinta edición (cuarta en español), Naucalpan de Juárez, México.

Timoshenko S y Goodier N, 1951, Theory of elasticity, McGraw-Hill, Second edition, New York.

Zavala J, 2005, Evaluación y rediseño del plenum superior del reactor R-10 de la empresa Orinoco Iron, C.A, Trabajo de Grado, UNEXPO Vicerrectorado Puerto Ordaz.