

Análisis térmico-mecánico de los segmentos de máquinas briqueteadoras en industrias siderúrgicas

Jaimes Saúl

sajv911@gmail.com

Universidad Politécnica Antonio José de Sucre, Puerto Ordaz, Venezuela

<https://orcid.org/0000-0002-8763-5513>

Estado Bolívar - Venezuela

Recibido (04/03/20), Aceptado (24/03/20)

Resumen: Se realiza un análisis térmico-mecánico del comportamiento de los segmentos de los rodillos de las máquinas briqueteadoras por efecto del choque térmico y esfuerzos ejercidos en la pieza. Se pretende obtener las principales causas que generan este problema, mediante un análisis mecánico que permitió simular el comportamiento en presencia de varios gradientes térmicos. La finalidad del estudio es reducir costos de mantenimiento y la sustitución y reparación continua de segmentos, así como las pérdidas en toneladas de producción a causa de la falla que son de gran impacto para la industria. Esta investigación permite conocer en qué medida los parámetros operativos, tales como: temperatura del material, presión, torque, velocidad de los rodillos influyen en la vida útil de los segmentos de acuerdo a su material de fabricación y en función de estos se simuló el comportamiento durante el proceso de briquetado.

Palabras Clave: Simulación, elemento finito, briquetas.

Thermal-mechanical analysis of the briquetting machine segments in steel industries

Abstract: A thermal-mechanical analysis of the behavior of the segments of the rollers of the briquetting machines is carried out due to the effect of thermal shock and efforts exerted on the part. It is intended to obtain the main causes that generate this problem, through a mechanical analysis that simulated the behavior in the presence of several thermal gradients. The purpose of the study is to reduce maintenance costs and the continuous replacement and repair of segments, as well as losses in tons of production due to the failure that are of great impact to the industry. This investigation allows us to know to what extent the operating parameters, such as: material temperature, pressure, torque, speed of the rollers influence the life of the segments according to their manufacturing material and based on these the behavior is simulated during the briquetting process.

Keywords: Simulation, finite element, briquettes.



I. INTRODUCCIÓN

ORINOCO IRON es una empresa, dedicada a la producción de briquetas de hierro prerreducido, mediante el proceso de reducción directa MIDREX en el cual, los óxidos de hierro son reducidos por la reacción química de éstos, con gases reductores.

Con este propósito, la planta cuenta con cuatro máquinas briqueteadoras, en las cuales, el hierro prerreducido es compactado mediante la presión ejercida entre rodillos que giran en direcciones opuestas y que poseen anillos segmentados en los cuales se amolda el material; dando lugar a la conformación de las briquetas.

Dado que el proceso de briqueteadado opera bajo condiciones de presión, temperatura, velocidad y torque elevados, es necesario el empleo de segmentos elaborados de materiales capaces de soportar tales condiciones de trabajo. Sin embargo, los segmentos actualmente presentan una serie de fracturas, que se deben probablemente al material del cual están fabricados o a los parámetros de servicio en los que operan.

Por lo tanto, este trabajo permitió obtener las principales causas que generan este problema, mediante un análisis mecánico que permitió simular el comportamiento al estar presente varios gradientes térmicos, con la finalidad de reducir los costos de mantenimiento y la sustitución y reparación continua de segmentos.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: en la sección I, se muestra la introducción; luego en la sección II, se pueden visualizar la metodología de empleada en la investigación; más adelante en la sección III se muestra el desarrollo del estudio propuesto y en la sección IV se detallan los resultados obtenidos, después en la sección V se realiza la discusión de los resultados obtenidos y por último se presentan las conclusiones más relevantes.

II. DESARROLLO

A. Análisis por Elementos Finitos: Workbench

Análisis por elementos finitos o FEA, por sus siglas en inglés es una representación matemática de un sistema físico que abarca una pieza/montaje (modelo) [4], características materiales, y condiciones de borde aplicables (designadas en el pre-procesamiento), la solución de esa representación matemática (solving), y el estudio de resultados de esa solución (post-procesamiento). Las formas simples y los problemas simples pueden ser, y están a menudo, hechos a mano; pero la mayoría de las piezas del mundo real son muy complejas para hacerlas exactamente, aún menos rápidamente, sin uso de una computadora y de un software apropiado de análisis.

B. Pre-Procesamiento

Es la primera parte para llevar a cabo un análisis, para ello, el software de FEA utiliza típicamente una representación en CAD del modelo físico y lo divide en pedazos más pequeños llamados los elementos finitos (pensar en un rompecabezas tridimensional). Este proceso es llamado mallado. Cuanta más alta es la calidad del mallado, mejor es la representación matemática del modelo físico. El propósito primario de un elemento es conectar nodos con las ecuaciones matemáticas fiables basadas en unión entre los nodos; el tipo de elemento utilizado depende a menudo del problema que se busca solucionar [5].

El comportamiento de cada elemento, por sí mismo, es muy bien entendido. Combinando los comportamientos de cada elemento usando ecuaciones simultáneas, se puede predecir el comportamiento total de las formas que de otra manera no serían entendidas usando las ecuaciones básicas de cálculo encontradas en manuales típicos de la ingeniería.

C. Elementos

Para fines generales, los programas mecánicos modernos de FEA, utilizan típicamente un sistema selecto de elementos elegidos por su flexibilidad, robustez, y su contribución total a la facilidad de la solución. WORKBENCH utiliza varios tipos primarios del elemento y tomará de manera automática los elementos de más alta categoría (10 nodos cuadráticos) tetraedro (H) (SOLID 187 en ANSYS) para las geometrías de modelo sólido, en cualquier caso, se emplean los elementos de categoría alta (20 nodos) elemento ladrillo (SÓLIDO 186).

En los modelos superficiales cerrados [6] [7], “cuadrilátero-dominante” (4 nodos) los elementos de cáscara (SHELL 181), se utilizan proporcionando exactitud y eficacia mientras que son convenientes para los algoritmos de mallado automático robusto usados en la simulación WORKBENCH. Y, para la interacción de las partes dentro de un ensamblaje, se utilizan los elementos de contacto (CONTACT 170/174). Para modelos de vigas con características de soldadura, elementos de viga se emplean (BEAM 188). ANSYS WORKBENCH aplica estos varios tipos

del elemento automáticamente.

Cada elemento abarca dos o más nodos los cuales ayudan a definir la forma para transportar reacciones físicas a partir de un elemento al siguiente. El finito en FEA viene del hecho de que hay un número conocido de elementos en un modelo de elementos finitos. El solver (sistema de solución) suma los comportamientos individuales de cada elemento para predecir el comportamiento del sistema físico entero.

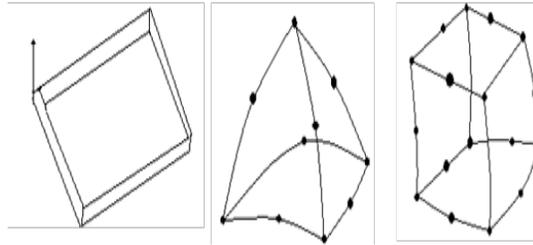


Fig. 1. Tipos de elementos comunes usados en ANSYS WORKBENCH.

D. Mallado (Meshing)

ANSYS WORKBENCH proporciona dos formas de mallado automatizado: Completamente automático y Automático manualmente dirigido. Ambas formas emplean una filosofía de ensayo y error, si ocurre un problema, por lo menos doce tentativas de la resolución del mismo automáticamente se hacen antes de que el mallado falle y marque el área de la dificultad con una etiqueta. El mallado manual dirigido que el usuario puede especificar la malla en áreas puntuales de una pieza (borde, cara) o la densidad de mallado de la línea base en las piezas enteras que diferencian de otras partes dentro del ensamblaje, para los propósitos de la exactitud o de la eficacia.

E. Solución (Solving)

El software emplea tres de los solvers de ANSYS y elige automáticamente el apropiado o eficiente para el trabajo actual. Además de realizar tipos juntados de análisis (térmico-esfuerzo, esfuerzo-modal, térmico-esfuerzo modal) así como algunos limitados tipos de análisis no lineales (térmico con temperatura dependiente de las propiedades del material y convección, geométricos/contacto con despegue de soporte del contacto). Todos los ajustes del solver y propagaciones de la iteración a partir del lapso de la solución al siguiente se realizan automáticamente.

F. Post Procesamiento.

Después de resolver todas las ecuaciones, a la salida del solver se tiene una cantidad considerable de información. Esta cantidad de información en bruto sería normalmente difícil de interpretar sin clasificar los datos y sin representarlos gráficamente es aquí en el post-procesamiento donde se crean las exhibiciones gráficas que demuestran la distribución de las tensiones, esfuerzos, deformaciones, temperaturas, y otros aspectos del modelo.

La interpretación de estos resultados post procesados es la llave a identificar o la información valiosa sobre otras características de funcionamiento del modelo (térmico, modales) que no serían conocidas de otra manera hasta que un modelo físico fuese construido y probado.

G. Análisis Térmico en una Modelación

Un análisis térmico calcula la distribución de temperaturas y otros valores asociados a un sistema o componentes. Los valores que se pueden tener entre este tipo de análisis, son: La distribución de temperatura, la cantidad de calor ganado o perdido, gradiente térmico y flujo térmico [8].

La simulación térmica desempeña un rol importante en el diseño de muchas aplicaciones en la ingeniería, como motores de combustión interna, turbinas, sistemas de tuberías y componentes electrónicos entre otros. En muchos de los casos, se tiene un análisis térmico en combinación con un análisis de esfuerzos para el cálculo de esfuerzos térmicos, esto es referido a esfuerzos causados por dilataciones o contracciones térmicas.

Un análisis básico en Ansys, es obtenido de una ecuación de balance de calor por el principio de conservación de energía. La solución a través de elementos finitos, representa el cálculo de temperatura en nodos, y estos resultados son utilizados para obtener otros valores como pérdidas o ganancia de calor, gradiente térmico entre otros.

H.Mecanismos de Transferencia de Calor

Existen tres formas de transferencia de calor llamadas: Conducción, convección y radiación. Cada uno de estos modos puede estudiarse por separado, si bien la mayoría de las aplicaciones de ingeniería son combinaciones de las tres formas. No obstante, un estudio profundo de los mecanismos asociados a cada una de las formas mencionadas anteriormente permite extender fácilmente el análisis al problema combinado [9] [10].

I.Transferencia de Calor por Conducción

La conducción es el único mecanismo de transferencia de calor posible en los medios sólidos opacos. La conducción térmica es la transferencia de calor en el interior de un medio material sólido, líquido o gaseoso. En los sólidos, y particularmente en los metales, la conducción se debe: (a) al desplazamiento de electrones libres, y (b) a la vibración de la red cristalina. A temperaturas bajas, este último fenómeno, que es la vibración de la estructura cristalina de un material, constituye el mecanismo primario de la conducción térmica. Independientemente del mecanismo, la energía se transfiere de un átomo (o molécula) a otro, dando por resultado un flujo de energía a través del medio físico.

En los líquidos el mecanismo de la conducción de calor es una combinación del movimiento de los electrones y el efecto de colisión molecular. La conducción de estos materiales depende de la temperatura, y no de la presión. En un gas, el mecanismo de la conducción térmica depende de la presión y la temperatura, que intervienen obviamente, haciendo aumentar la posibilidad de las colisiones moleculares.

Cuando en estos cuerpos existe un gradiente de temperatura, el calor se trasmite de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura debido al contacto directo entre las moléculas del medio. Cuando en un cuerpo existe un gradiente de temperatura, la experiencia muestra que hay una transferencia de energía desde la región a alta temperatura hacia la región de baja temperatura.

J.Convección

La convección es la transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido. Se trata de una modalidad combinada, ya que el calor en las interfaces sólido-fluido se transfiere por conducción mediante las colisiones o choques entre las moléculas del sólido y las del fluido. Como resultado de estas acciones se produce en el fluido un cambio de temperatura y, en consecuencia, una variación de densidades, de lo que resulta un movimiento del fluido. Ocurre un proceso de mezcla de las diversas porciones a alta y a baja temperatura en dicho fluido, se transfiere así la energía térmica por transporte de masas de fluido.

Los problemas de convección en la transferencia de calor son considerablemente más difíciles que los que se encuentran en la conducción y con demasiada frecuencia es imposible encontrar soluciones analíticas. Dichas dificultades surgen del hecho de que el mecanismo básico para la convección es una combinación de conducción y dinámica de los fluidos. La convección ocurre siempre que una superficie está en contacto con un fluido y este tiene temperatura diferente a la de la superficie en cuestión.

K.Radiación

La radiación presenta una diferencia fundamental respecto a la conducción y la convección; las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separadas por un vacío. La radiación es un término que se aplica generalmente a toda clase de fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas.

L.Bases Matemáticas para Análisis Térmicos

Para resolver un problema termo mecánico, se debe obtener la solución de las ecuaciones con las condiciones de borde apropiadas; a continuación, la ecuación general de transferencia de calor y las condiciones de borde térmicas [11].

Ecuación General de la Transferencia de Calor

La ecuación general de conducción de calor que gobierna la distribución y la conducción del flujo de calor en un sólido que tenga propiedades físicas uniformes [12] [13].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + h \Delta T + \sigma \varepsilon_i F_{ij} A_i (T_i^4 - T_j^4) \quad (1)$$

Conducción

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_r r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k_\phi \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q' = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

La ecuación (2) discretizada es

$$\begin{aligned} & \frac{k_r}{r} \left[\frac{T_{(t,(r+1)\Delta r)} - 2T_{(t,r\Delta r)} + T_{(t,(r-1)\Delta r)}}{\Delta r^2} \right] + \frac{k_\phi}{r^2} \left[\frac{T_{(t,(\phi+1)\Delta \phi)} - 2T_{(t,\phi\Delta \phi)} + T_{(t,(\phi-1)\Delta \phi)}}{\Delta \phi^2} \right] \\ & + \frac{k_z}{z} \left[\frac{T_{(t,(i+1)\Delta z)} - 2T_{(t,i\Delta z)} + T_{(t,(i-1)\Delta z)}}{\Delta z^2} \right] + q \\ & = \rho c_p \frac{1}{(\Delta t)^2} [T_{(t+1)} - 2T_{(t)} + T_{(t-1)}] + \iint_A h(T_s - T_\infty) dx.r.d\phi \end{aligned} \quad (3)$$

Ecuaciones de esfuerzos

Deformación

$$\varepsilon_r = \frac{1}{\epsilon} [\sigma_{nr} - \mu(\sigma_{n\phi} + \sigma_{nz})] \quad (4)$$

$$\varepsilon_\phi = \frac{1}{\epsilon} [\sigma_{n\phi} - \mu(\sigma_{nr} + \sigma_{nz})] \quad (5)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{\epsilon} [\sigma_{nz} - \mu(\sigma_{nr} + \sigma_{n\phi})] \quad (6)$$

Esfuerzos

$$\begin{bmatrix} \sigma_{nr} & \tau_{r\phi} & \tau_{rz} \\ \tau_{r\phi} & \sigma_{n\phi} & \tau_{\phi z} \\ \tau_{rz} & \tau_{\phi z} & \sigma_{nz} \end{bmatrix} \quad (7)$$

M.El Proceso de briqueteado

El proceso de reducción es conocido como “reducción directa”, el cual se realiza bajo tecnología MIDREX®, usando 70% y 30% mineral de hierro, estos son llevados por una cinta a 45° a la tolva de carga, la cual a su vez alimenta al reactor, que realiza el proceso de reducción (extraer oxígeno del material). Una vez que el mineral ya está reducido y obtenido el metálico requerido, este inicia el descenso por una serie de elementos hasta llegar a las máquinas briquetadoras, obteniendo Hierro Briqueteado en Caliente (HBC).

Una vez reducido el material, éste baja del horno a 750°C aproximadamente, se alimenta a la máquina por un tubo (pierna), luego el material llega a la tolva, donde está instalado (en su parte inferior) el Coil Assambly, y allí se forma la masa a ser briquetada. Aquí el material es empujado por el tornillo alimentador, el material es mantenido dentro de los rodillos mediante unas pletinas laterales. Al mismo tiempo que el material es alimentado, los rodillos están girando, produciéndose de esta forma la compactación en los bolsillos de los segmentos.

La briqueta es el resultado de haber compacto el hierro reducido, las briquetas son de variados tamaños y dependen del tamaño del bolsillo de los segmentos. Las dimensiones de la briqueta estándar producida por Orinoco Iron son de 106x48x32 mm, para un peso cúbico ≥ 5 gr/cm³.



Fig. 2. Diferentes tipos de Briquetas.

Recientemente se han realizado pruebas variando el tamaño de las briquetas (aumentando el bolsillo de los segmentos y tamaño de segmentos) con el objeto de aumentar la producción y aplicar ciertas modificaciones que mejoren el rendimiento de los segmentos.

Orinoco Iron posee cuatro máquinas briqueteadoras en su línea de producción.

La máquina briqueteadora consta una prensa de rodillo, de un motor eléctrico de velocidad variable de 360 a 1800 revoluciones de 464 kW, un reductor de cinco etapas con un índice de reducción de 110, una tolva de carga, un tornillo alimentador.

La prensa de rodillos está integrada por un bastidor, los rodillos briqueteadores, sistema de presurización (Unid rolls pressure), separador de briquetas, un bajante (String Chute), dos pletinas laterales (Cheek plate) y un anillo (Coil Assembly). Las revoluciones de los rodillos son regulables con un máximo de 16,3 rpm y un mínimo de 3,2 rpm. La presión de 120 kN/cm² y un apriete del sistema hidráulico 2.640 kN [14] [15].

Los rodillos de la máquina están dispuestos de una forma paralela entre sí, separados a una distancia de 3, 2 o 1 mm denominado Gap estático, según sea el caso. La máquina posee un bastidor donde hay dos columnas fijas en las que se apoya uno de los rodillos (rodillo fijo). El proceso de briquetado se realiza mediante el giro de los rodillos, generándose compactación a través del empuje horizontal que es transmitido por cuatro gatos hidráulicos en el rodillo opuesto (rodillo flotante). El empuje vertical que ejerce el tornillo alimentador cuando oprime el material contra los rodillos genera una fuerza que trata de separar a los rodillos.

Teniendo un rodillo que no puede moverse (rodillo fijo) el empuje es contrarrestada con cuatro cilindros hidráulicos (instalados en rodillo flotante en los extremos) con una presión máxima de 220 Bar. Este ciclo es constante teniéndose fluctuaciones tanto en el giro como en el empuje, las cuales son controlados por una serie de válvulas reguladoras con un programa de máxima carga que evita picos muy altos de presión.

El rodillo briqueteador es una pieza fabricada de un acero muy especial, de forma cilíndrica maciza de $\varnothing=740$ mm (diámetro donde asientan los segmentos), con una longitud de 2330 mm. El rodillo posee agujeros internos para enfriamiento del núcleo.

Sobre los rodillos se instalan los segmentos (en el núcleo, ubicado en el centro del rodillo) y las chumaceras (en los extremos), siendo los segmentos los elementos que forman la briqueta y las chumaceras los apoyos a los cuales se transmite la carga a los rodillos y funciona como base para el desplazamiento en el chasis de la máquina (el rodillo que corresponde al lado flotante).

Los segmentos son los elementos que conforman a la briqueta, son fabricados de acero especial, dentro de los principales elementos que lo conforman se encuentran el tungsteno, cromo, vanadio, Titanio, manganeso, níquel, entre otros, siendo su dureza de 64 HRC. Estos van dispuestos de forma cilíndrica sobre los rodillos. En cada rodillo se le instalan 12 segmentos, para un total de 24 segmentos por máquina.

Los segmentos están en contacto directo con el material reducido, llegando a trabajar a temperaturas hasta de 400° C. Los esfuerzos a los que se someten los segmentos son de 220 bares de presión.



Fig. 3. Segmento estándar Ø 1010.

Dentro de los daños más frecuentes que se presentan en los segmentos se tiene principalmente:

- Grietas.
- Deformación del bolsillo.
- Desgaste (en la cresta, ganchos).
- Incrustaciones.
- Fluencia lenta (Creeps).

Las grietas son de diferentes formas, tamaños y en diferentes zonas de los segmentos. De todas estas la de mayor consecuencia son aquellas que producen fracturas, más aún cuando estas aparecen prematuramente.



Fig. 4. Típica Rotura de Segmentos, en la cola.

Los segmentos tienen un rango de trabajo que no debe exceder de 350 °C, y no deben ser llevados a presiones máximas (torque de briqueteado) antes de los 230 °C. Cada máquina posee un ciclo de trabajo de aproximadamente 180 horas y un periodo de mantenimiento de 16 horas. En ocasiones el arranque no sucede inmediatamente después de haber realizado el mantenimiento y se espera a que se necesite parar otra máquina para arrancar la máquina que se encuentra parada.

Parámetros de funcionamiento

Parámetros del proceso de briqueteado.

Temperatura del material: 650-700 °C.

Presión: 200-215 bar.

Torque: 3500 N.m

Velocidad de los rodillos: 6,0-7,0 rpm

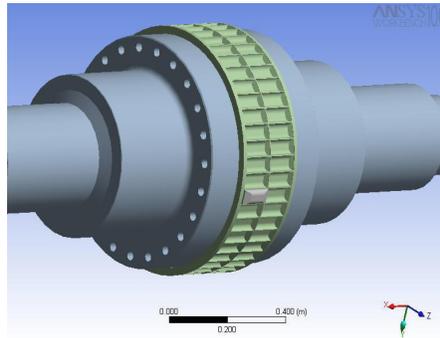


Fig. 5. Modelo representativo del segmento

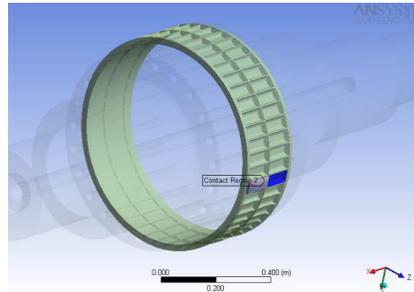


Fig. 6. Región de contacto

Simulación

Se realizó la corrida del paquete de simulación por elementos finitos con datos compilados teóricamente. Para su desarrollo se tomó de un modelo tridimensional de la configuración, con el fin de simular el mecanismo de formación de grietas en los segmentos por efecto del choque térmico [12].

Esta simulación fue realizada en base a un análisis termo-estructural de tipo transitorio, en el cual, se utilizó un mallado libre en forma tetraédrica para cubrir los ángulos y partes circulares del segmento con el menor margen de error posible.

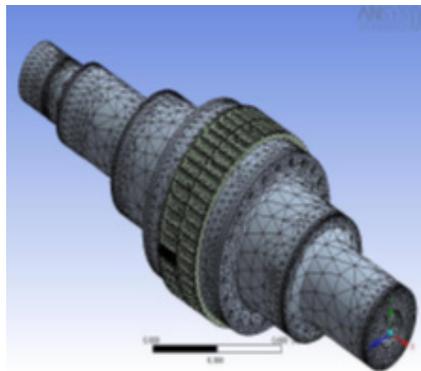


Fig. 7.- Representación del mallado de la configuración.

A continuación, se muestran algunas tablas, en la tabla I los datos de las propiedades constantes del acero herramienta (región de contacto) para la corrida del modelo y en la tabla II los datos de las propiedades de la fundición de hierro (región de contacto) utilizadas en la corrida del modelo:

Tabla I. Propiedades utilizadas para la elaboración de la simulación.

Propiedades del acero herramienta	Unidad	Valor
Densidad	(kg/m^3)	7780
Coefficiente de Poisson		0,3
Calor específico	J/kg.°C	418
Conductividad termica	W/m.°C	28
Permeabilidad relativa		0
Resistividad	Ohm.m	0

Tabla II. Propiedades utilizadas para la elaboración de la simulación

Propiedades del acero herramienta	Unidad	Valor
Densidad	(kg/m^3)	7870
Coefficiente de Poisson		0,29
Calor específico	J/kg.°C	440
Conductividad termica	W/m.°C	72,6
Permeabilidad relativa		0
Resistividad	Ohm.m	0
Modulo de Young	Pa	2×10^{11}

Por su parte, es necesario establecer las condiciones a las cuales está sometido el segmento en la simulación, dichas cargas son mostradas en la figura 8.

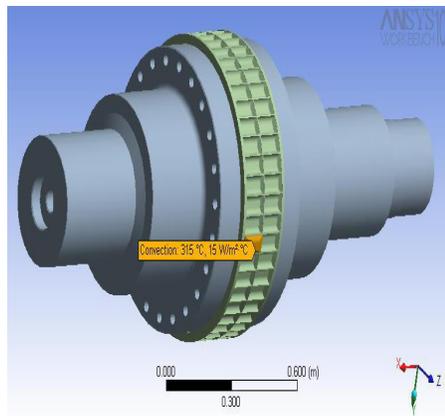


Fig. 8. Condiciones de borde a las cuales están sometidos los segmentos.

En la figura 8 se muestra la convección a la que está sometido el segmento que está a $315\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $15\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$, la temperatura de la briqueta a $640\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la presión del sistema que va en esa dirección por la tercera ley de Newton, éste realiza una fuerza de igual intensidad y dirección, pero de sentido contrario sobre el cuerpo que la produjo. Dicho de otra forma, las fuerzas siempre se presentan en pares de igual magnitud, sentido opuesto, la presión obtenida es la resultante de la presión que se aplica en toda el área de la briqueta.

III. METODOLOGÍA

Se consideró conveniente desarrollar una investigación con el propósito de conocer en qué medida los parámetros operativos (temperatura del material, presión, torque, velocidad de los rodillos) influyen en la vida útil de los segmentos de acuerdo a su material de fabricación y en función de estos se simuló el comportamiento durante el proceso de briqueteado [1].

El proceso de la planta, emplea 4 máquinas briquetadoras del tipo rodillos segmentados, cuya producción horaria está entre las 95 -100t/h de unidades. El diseño que poseen los segmentos que compactan el material prerreducido, hacen que las briquetas obtenidas adopten la forma de almohadillas. Estos segmentos están elaborados de

un acero de alta dureza para reducir el desgaste (acero de herramienta AISI M3) el cual pertenece a la categoría de aceros rápidos. Sin embargo, desde el año 1994 [2], se han presentado diversos casos de fracturas en los segmentos.

Las principales causas que generan las fracturas de los segmentos son los materiales con el cual son fabricados, el tránsito de material sobredimensionado y el elevado diferencial de temperatura (ΔT) que existe entre los segmentos y el material prerreducido [3] [4]. Como causas secundarias se tienen: el calentamiento excesivo por falla del sistema de enfriamiento de los rodillos y el mal ensamblaje. El registro de falla de los segmentos muestra la estadística de fractura de éstos, teniendo 4 segmentos fracturados en el año 2000 y 16 segmentos fracturados para el año 2009. Actualmente, alrededor de cada cuatro meses se presentan paradas no programadas, por segmentos que muestran este tipo de falla. Para solventar esta situación, la primera medida que se toma es el cese del funcionamiento de la máquina briquetadora que presenta la fractura, seguido del incremento en las velocidades de los rodillos de las máquinas que queden operativas, esto con el objeto de compensar y mantener la producción horaria.

Con miras a reducir la tendencia creciente que se percibe en los registros históricos de mantenimiento de la planta se hace necesario ahondar en las causas de las fallas que presentan en servicio. En tal sentido, se realizó un análisis mecánico que permitió simular el comportamiento al estar presente varios gradientes térmicos, con la finalidad de reducir los costos de mantenimiento y la sustitución y reparación continua de segmentos, así como las pérdidas en toneladas de producción.

Debido al elevado costo que trae para la empresa, la desincorporación de una máquina, surge la necesidad de hacer una revisión de los segmentos tomando en cuenta los parámetros de temperatura, densidad, conductividad térmica, presión, torque y velocidad de los rodillos, y de esta forma observar donde y porque se originan las fracturas de los mismos.

IV.RESULTADOS

Para el desarrollo del trabajo se consideró la realización de un modelo de la configuración del rodillo y el segmento, utilizando como herramienta un paquete de simulación a través del cálculo por elementos finitos. Las figuras mostradas a continuación, reflejan los resultados obtenidos:

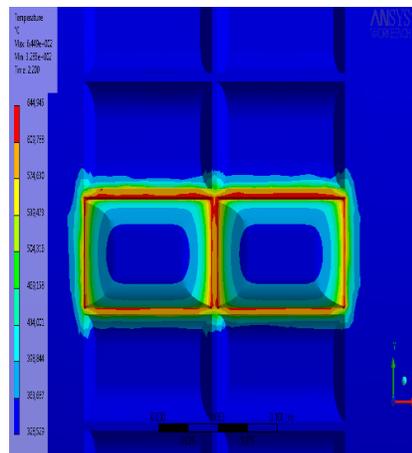


Fig. 9. Distribución de la temperatura entre el segmento y la briqueta.

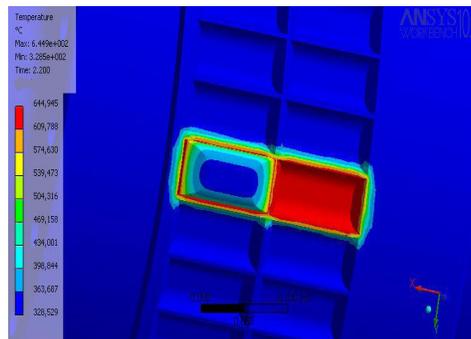


Fig. 10. Distribución de la temperatura entre el segmento y la briqueta.

La figura 9, muestra la distribución de temperatura entre el segmento y la briqueta durante el briqueteado. Esta distribución, a través de isotermas muestran las distintas temperaturas presentes en los primeros momentos donde entra en contacto el mineral pre reducido y los segmentos puestos en servicio.

Se observa que los bolsillos de los segmentos experimentan un mayor calentamiento producto del contacto directo con el mineral de hierro, identificado por la zona de color rojo de la figura, alcanzando valores aproximados de hasta 644,945 °C en un pequeño lapso de tiempo, lo cual tiene incidencia directa en la generación de una gran expansión térmica de este volumen a causa del elevado gradiente térmico.

Por su parte, la figura 10, representa la sección interna del modelo en vista isométrica y vista semi frontal respectivamente, mostrando la distribución de temperatura en la parte interna del segmento, a través, de las distintas isotermas que conforman al mismo.

En la figura es posible observar el incremento de la temperatura desde el interior del segmento hacia los bordes del mismo, producto de la expansión térmica experimentada, como una causa directa del gradiente térmico soportado por el mismo, al momento del proceso de briqueteado.

La forma como se observa la temperatura alcanzada en la parte interior del segmento, aunado con la expansión ocasionada por la gran diferencia de temperatura mineral-segmento, nos proporciona una clara idea acerca del mecanismo de formación de grietas en el segmento, ya que, es notorio que la parte interior, la cual presenta la temperatura más elevada, es la que tiene menor área y el tiempo de briqueteado es muy rápido y se concentra mayor calor en esa área del modelo.

La configuración que experimenta el segmento en la gráfica de isotermas explica que la zona de mayor calentamiento sufre una deformación en los puntos cercanos a las esquinas del segmento, motivado a que es la zona de contacto directo con el mineral. Esta configuración geométrica nos indica que la falla se inicia en las esquinas y bordes del segmento ya que los bordes actúan como concentradores de esfuerzos y la misma puede estar asociada a un debilitamiento de la estructura por los cambios volumétricos (Expansión) y la diferencia de temperatura que aumenta el nivel de energía de los átomos y esto conduce a los cambios en el material.

El comportamiento experimentado por ambos materiales de acuerdo al análisis térmico realizado, arrojaron los resultados reflejados en la figura 11 donde se observa mediante una gráfica de dicho comportamiento:

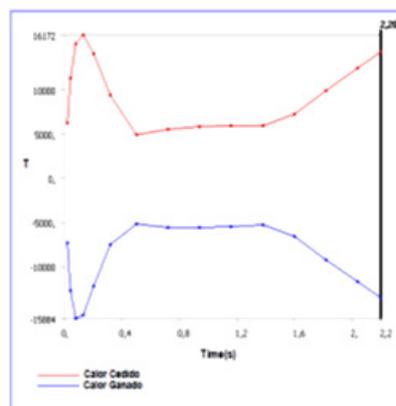


Fig. 11. Representación gráfica del comportamiento del flujo direccional de calor experimentado por las

las piezas.

Se puede observar que las piezas simuladas, manifestaron un comportamiento regular, ya que como se observa son iguales pero inversas (lo cual indica que la simulación está correcta). La línea roja muestra que el calor está fluyendo de las briquetas a los segmentos, por esa razón se observa que mientras pasa el tiempo la briqueta pierde calor, el cual lo está ganando el segmento. Esto nos indica con más detalle que hay un elemento que está cediendo calor y otro lo está absorbiendo a igual magnitud. Se cumple la ley de conservación de la energía que constituye el primer principio de la termodinámica y afirma que la cantidad total de energía en cualquier sistema aislado permanece invariable con el tiempo, aunque dicha energía puede transformarse en otra forma de energía.

Simulación de los esfuerzos mecánicos a los cuales se someten los segmentos.

En el modelo realizado, se consideró la configuración de un rodillo, al cual, se le incluyó un segmento de briqueteado y al cual se le introdujo un modelo de la briqueta, con el fin de representar los esfuerzos mecánicos presentes en la misma

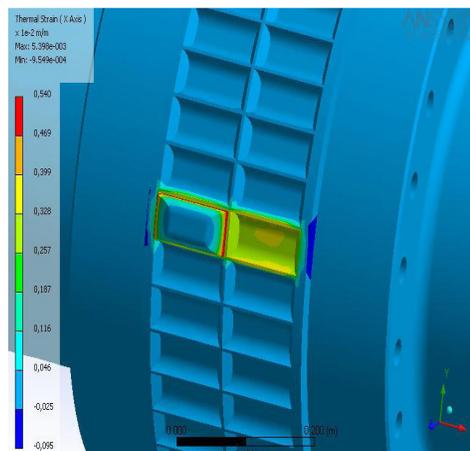


Fig. 12. Deformación térmica.

En las figuras 12 se muestra la deformación térmica, o deformación unilateral térmica, que es el resultado de cambios volumétricos producidos por cambios estructurales durante el calentamiento, así como tensiones térmicas causadas por variaciones de temperatura al interior de la pieza. El acero por la excitación interna de sus moléculas tiende a separarse, por lo que en general produce una expansión del material, algunos también le llaman dilatación térmica.

Evaluación del impacto de los esfuerzos en la estabilidad térmica de las máquinas briqueteadoras.

El indicador FS (Factor de Seguridad), representa una medida para caracterizar cuantitativamente la resistencia a los esfuerzos mediante los análisis realizados a las máquinas briqueteadoras. Es un número que se utiliza en ingeniería para los cálculos de esfuerzos de elementos o componentes de maquinaria, estructuras o dispositivos en general, proporcionando un margen extra de prestaciones por encima de las mínimas estrictamente necesarias.

El factor de seguridad se calcula por medio de los esfuerzos de deformación del acero, es decir, el esfuerzo real a que se está sometiendo el material, y se calcula tomando en cuenta también el esfuerzo admisible del acero, con estos dos valores se calcula el factor de seguridad, y lo que indica es la seguridad o confianza que el material te da para decir si éste va a trabajar con seguridad o no.

Según los comentarios anteriores, la temperatura del producto determina la fuerza requerida en los rodillos de presión, si se mantienen constantes las otras propiedades del producto y la densidad aparente requerida. Esta fuerza de presión se logra usando un sistema hidráulico de alta presión el cual emplea cuatro cilindros hidráulicos de doble acción, dos bombas de alta presión, dos bombas de baja presión, dos acumuladores y válvulas de control direccional.

Si la especificación de la densidad de las briquetas está un poco por debajo de $5,3 \text{ g/cm}^3$, se puede incrementar la presión de trabajo manteniendo constante la temperatura.

Análisis térmico del procesamiento del programa por elemento finito de las máquinas briquetadoras en función de sus parámetros.

El comportamiento experimentado por las máquinas briquetadoras de acuerdo a los análisis realizados para determinación de la falla de las mismas indican que la convección durante el proceso se consideró constante, nos indica también las temperaturas de los elementos en el proceso, en este caso la briqueta la convección no varía en el proceso ya que el tiempo del mismo es muy pequeño; pero si aumenta el volumen y, por lo tanto; se produce la expansión térmica y un cambio en la energía del sistema.

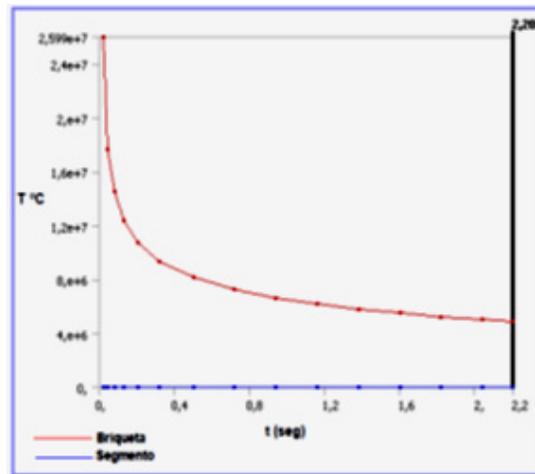


Fig. 13. Comportamiento del flujo de calor.

En la figura 13 se representa el flujo de calor total del sistema de briquetado. La línea roja demuestra que el calor está fluyendo de las briquetas a los segmentos, por esa razón se puede observar que mientras pasa el tiempo; la briqueta pierde calor, la cual está ganando el segmento, esto cumple con la ley de conservación de la energía.

El calor que ganan los segmentos durante el proceso de briquetado se controla mediante el sistema de enfriamiento de los rodillos, el cual, consta de un circuito en el interior de los cuerpos del rodillo. La refrigeración se realiza mediante una caña que va de extremo a extremo por el núcleo de los rodillos. En el centro de la caña se encuentra una goma de sello que distribuye el agua por todo el sistema.

El agua entra a una temperatura de 35°C y sale entre los $60\text{-}65^\circ\text{C}$ aproximadamente para así evitar el calentamiento excesivo. La entrada y salida del agua se controla mediante una unión rotatoria. Cuando falla el sistema de enfriamiento, se produce un sobrecalentamiento que funde la goma de sello y los segmentos tienden a fracturarse. Esto puede generarse por un bajo ΔT en el agua de enfriamiento o bien sea, por un alto o bajo flujo de agua de refrigeración en los rodillos.

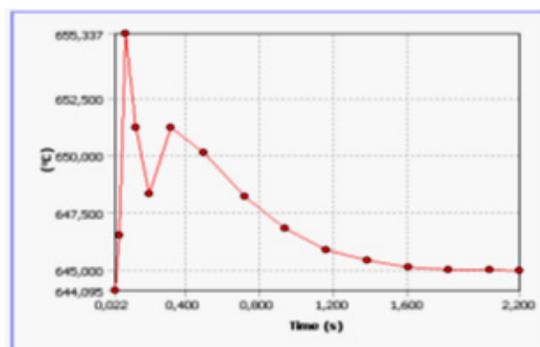


Fig. 14. Comportamiento de la temperatura de la briqueta durante el tiempo.

Por su parte; la figura 14, se representa la variación de temperatura de la briqueta durante el tiempo de briquetado, podemos observar que tiene un comportamiento irregular, éste debido a que el flujo de calor ocurre en un área donde se presentan, curvas y rectas como son los bolsillos de los segmentos, razón por la cual la temperatura de la briqueta tiene ciertos picos al ir disminuyendo su temperatura.

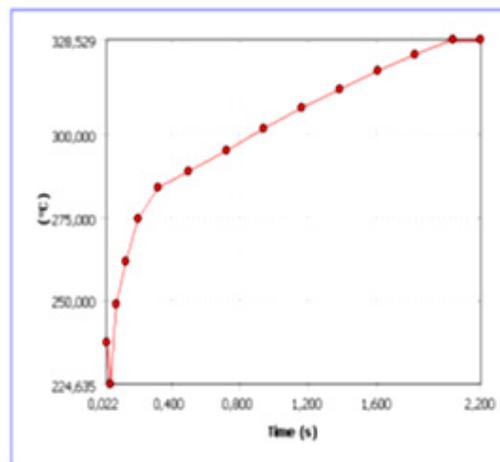


Fig. 15. Comportamiento de la temperatura del segmento.

Estos resultados de la figura 15 son la manifestación del elemento que está absorbiendo calor en este caso el segmento, mientras pasa el tiempo absorbe más calor, el que está emitiendo las briquetas; por lo tanto, el chequeo constante de esta variable de refrigeración de los segmentos es de vital importancia dado que la temperatura de los segmentos al superar los 350°C comienza a fracturarse.

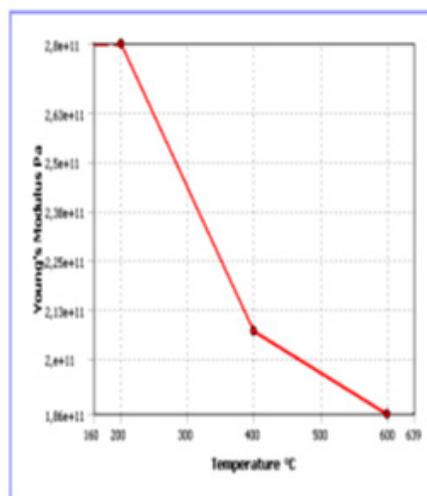


Fig. 16. Comportamiento del módulo de Young con respecto a la temperatura.

La figura 16 muestra el comportamiento del módulo de Young o modulo elástico con respecto a la temperatura, éste puede variar de forma importante con la composición química, con la temperatura y en menor medida con la deformación mecánica. Esta variación presente en la temperatura del sistema; afecta sustancialmente al proceso ya que aumenta linealmente con la temperatura para transiciones en las deformaciones.

V.CONCLUSIONES

El calentamiento brusco del segmento expuesto al contacto directo con el HRD, genera elevados gradientes térmicos ubicados en la sección del bolsillo que causan debilitamiento de su estructura debido a los cambios volumétricos que experimenta el segmento. Mayores presiones ejercidas a los segmentos, generarán una mayor expansión

en el material, ocasionando un mayor esfuerzo y conllevando a una gran probabilidad de agrietamiento.

- Los esfuerzos aplicados a las esquinas del segmento generan roturas en el mismo y fuga de calor, y ésta a su vez conlleva a una distribución térmica desigual, generando inestabilidad.

- El procesamiento del programa es preciso y representa una valiosa herramienta predictiva de los factores que afectan el sistema, ya que las variables involucradas en él, indican la influencia, que tiene cada una de éstas, en los resultados obtenidos.

- Los esfuerzos aplicados a las esquinas del segmento generan roturas en el mismo y fuga de calor, que conlleva a una distribución térmica desigual, generando inestabilidad.

REFERENCIAS

- [1] D. R. Askeland, *Ciencia e Ingeniería de Materiales*, México: Cengage Learning, 2009.
- [2] J. L. G. Velásquez, *Mecánica de Fractura*, México: Limusa, 2004.
- [3] J. E. H. G., *Introducción al análisis estructural por elemento finito*, Manizales: Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia, 2002.
- [4] S. H. Avner, *Introducción a la Metalurgia Física*, México: McGraw-Hill, 1998.
- [5] M. B. R. Al-Waked, «CFD simulation of wet cooling towers,» *Applied thermal engineering*, vol. 26, nº 4, pp. 382-395, 2006.
- [6] D. Barbi, L. Neves Filho y V. Silveira Júnior, «Convective heat transfer coefficients evaluation for a portable forced air tunnel,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, nº 2-3, pp. 229-233, 2010.
- [7] C. Barreno, «Simulación fluido dinámica del túnel de enfriamiento de ánodos verdes de la planta de molienda y compactación de Venalum,» Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre" Vice-rectorado Puerto Ordáz., Puerto Ordáz, 2016.
- [8] Y. Çengel, *Transferencia de Calor*, México: McGraw-Hill, 2004.
- [9] W. Fisher, M. Meir y M. Lustenberger, «Cooling of Green Anodes after forming,» *The Minerals, Metals & Materials Society*, vol. 4, nº 1, pp. 351-357, 2013.
- [10] F. Incropera y D. DeWitt, *Fundamentos de Transferencia de Calor*, México: Prentice Hall, 1999.
- [11] M. W. Meier, *Cracking behaviour of anodes*, Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 2007.
- [12] M. J. Morán y H. N. Shapiro, *Fundamentos de Termodinámica Técnica*, México: Reverté, 2004.
- [13] S. Ramakrishnan, R. Wysk y V. V. Prabhu, «Prediction of process parameters for intelligent control of tunnel freezers using simulation,» *Journal of Food Engineering*, vol. 65, nº 1, pp. 23-31, 2004.
- [14] M. A. Reinheimer, S. Mussati y N. J. Scenna, «Optimization of operating conditions of a cooling tunnel for production of hard candies Original Research Article,» *Journal of Food Engineering*, vol. 109, nº 1, pp. 22-31, 2012.
- [15] «Progress of Inert Anodes in Aluminium Industry : Review,» *Journal of Siberian Federal University*, vol. Special, nº Special, pp. 18-30, 2018.