



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD DE METALURGIA ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA.

TRABAJO DE DIPLOMA

En opción al título de

INGENIERO MECÁNICO

TITULO: Análisis del comportamiento de la resistencia mecánica en los tramos de árbol central en los hornos de reducción en las empresas de tecnología Caron en Cuba.

AUTOR: Karel Quesada Vega

TUTORES: M.Sc. Isnel Rodríguez Gonzáles.

Ing. Ramón Renato Rodríguez Rodríguez.

Ing. Geovanis Ruiz Martínez.

“Año 50 de la Revolución”

Moa, 2007



DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: Karel Quesada Vega autor de este trabajo de Diploma y los tutores Ms.C. Isnel Rodríguez González, Ing. Ramón Renato Rodríguez Rodríguez declaramos la propiedad intelectual de este servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

Diplomante: Karel Quesada Vega

Tutor: Ms.C. Isnel Rodríguez González

Ing. Ramón Renato Rodríguez Rodríguez



PENSAMIENTO

“La inteligencia consiste no solo en el conocimiento, sino también en la destreza de aplicar los conocimientos en la práctica”

Aristóteles



AGRADECIMIENTOS

A la Revolución, por haberme dado la oportunidad de formarme y realizar mis sueños.

A los profesores Ms.C. Isnel Rodríguez González y al Ing. Jeovanis Ruiz del ISMMM por asesorarme técnica y científicamente en la realización de éste trabajo.

A Ramón Rodríguez Rodríguez (Cañete) especialista en Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel por su valiosa colaboración y asesoría técnica.

A mis padres y a mi novia por apoyarme y ayudarme durante todos mis estudios.

A todos mis compañeros de la carrera, por su apoyo y colaboración.

A los que de un modo u otro contribuyeron con el desarrollo del trabajo.

A todos muchas gracias.



DEDICATORIA

Dedico la culminación de este trabajo a:

*A mi madre, mi padre, mi novia, hermana y a mi suegra
por el inmenso amor y apoyo que me han aportado,
teniendo en cuenta todo el tiempo que no pude
dedicarles.*

A toda mi familia.

A mis amigos.

A mis tutores:

*Ms.C. Isnel Rodríguez González
Ing. Ramón Rodríguez Rodríguez
especialista en Fundición*

A todas aquellas personas que me quieren.



RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolló un estudio sobre la resistencia mecánica de los tramos de árboles centrales de los hornos de reducción de las empresas con tecnología Caron. Se analiza la homogenización de un material para la fabricación de los mismos. También se investigan los fundamentos teóricos por los cuales se rigen los procesos que dan lugar al funcionamiento de estas tecnologías en dichas empresas. A partir del análisis de los resultados teniendo en cuenta la geometría de ambos tramos y las condiciones de diseño, se realiza la simulación por el Método de Elementos Finitos utilizando el software ANSYS versión 10.0, para visualizar la resistencia mecánica de los mismos. Además se realizó una observación de las principales causas que provoca el polvo desprendido sobre el Medio Ambiente y se exponen las medidas de seguridad e higiene necesaria a tener en cuenta para la explotación de los diferentes equipos y fluidos utilizados en la misma.



ABSTRACT

In this work is developed a study of the mechanical resistance of the trams of central shaft of the ovens of reduction of the companies with Caron technology. The homogenization of a material is analyzed for the production of the same ones. The theoretical foundations are also analyzed by which the processes are governed that give place to the operation of these technologies in this companies. The analysis of the results keeping in mind the geometry of both trams and the design conditions, it is carried out the simulation for the Method of Finite Elements using the software ANSYS version 10.0, to visualize the mechanical resistance of the same ones. Besides it was carried out an observation of the main causes that causes the powder removed on the Environment and the measures of security and hygiene of the necessary work are exposed to keep in mind for the exploitation of the different teams and fluids used in the same one.

**ÍNDICE**

Contenido	Págs.
Introducción	
Capítulo I Marco teórico- metodológico de la investigación	6
1.1- Introducción	6
1.2- Desarrollo de los aceros termo-resistentes	6
1.3- Hornos Metalúrgicos	9
1.4- Horno utilizado para el proceso de reducción del mineral	14
1.5- Principio y funcionamiento de los Horno de soleras múltiples (225-HR-205)	16
1.6- Factores que Influyen en la Operación del Horno	17
1.7- Características y funcionamiento del árbol central de los hornos de reducción	20
1.8- Influencia de las Altas y Bajas Temperaturas en los tramos de los árboles centrales	23
1.9- Métodos de elemento finito	24
1.10- Transformaciones realizadas en los tramos de árbol central	26
1.11- Conclusiones del Capítulo I	27
Capítulo II Materiales y Métodos	28
2.1- Introducción	28
2.2- Materiales y Métodos	28
2.3- Influencia del medio exterior en la resistencia a la fatiga	32
2.4- Material propuesto para la fabricación de ambos tramos	32
2.5- Cálculo de la resistencia Mecánica de los árboles de los hornos para ambas Empresas	33
2.6- Cálculo de la resistencia Mecánica del tramo B-159	34
2.7- Cálculo del coeficiente de seguridad para los tramos analizados	36
2.8- Cálculo para conocer la confiabilidad de la pieza	40
2.9- Modelación por el método de elemento finito	40
2.10- Conclusiones del Capítulo II	46
Capítulo III Resultados y Discusión	47
3.1- Introducción	47
3.2- Características del material homogenizado	47
3.3- Resultado de los cálculos de la resistencia mecánica	47
3.4- Modelación y Simulación por el Método de Elementos Finitos	51



3.5- Valoración económica y Medioambiental	58
3.6- Valoración Medioambiental	59
3.7- Conclusiones del Capítulo III	62
Conclusiones	63
Recomendaciones	64
Bibliografía.	65
Anexos.	---

INTRODUCCIÓN

En una sociedad impactada por la ciencia y la tecnología, todo ciudadano necesita de una cultura científico – tecnológica para entender, intrigarse y actuar en el mundo que lo rodea. Dado el amplio espectro que abarcan la ciencia en la vida de un ser humano, los objetivos de su enseñanza dentro del tramo obligatorio del sistema educativo no deben apuntar a la formación de ingenieros rutinarios, sino a impartir un concepto de ciencia para que todos desarrollen actitudes y aptitudes científicas que tengan utilidad genuina en la vida real.

Es necesario un viraje en el modo de pensar, que conduzca hacia un nuevo camino, como la vía energética suave, o camino del sol, basado en la reducción de las necesidades energéticas, es decir la utilización inteligente de la energía con el empleo de las fuentes renovables, como la radiación solar directa e indirecta, fuentes no contaminantes muy diversificadas y descentralizadas.

En la actualidad la búsqueda del ahorro de energía esta destinado para la mejora del aislamiento, técnicas de recuperación de energías residuales, empleo de energía alternativa y otras técnicas que permiten mejorar la eficiencia de los equipos instalados. Sin embargo, no se debe olvidar que desde el comienzo de la era industrial, los ahorros de energía más espectacular se han conseguidos por modificaciones de los procesos. Son tantas las consideraciones prácticas y análogas que podrían hacerse sobre casi todas las industrias, que llegan afirmar que las mayores posibilidades de ahorro de energía se encuentran en la modificación de los procesos.

La investigación científica es uno de los objetivos fundamentales de nuestra universidad, y dentro de ella es determinante el uso de las Nuevas Tecnologías de la Información (NTI) para garantizar la calidad de los resultados y la productividad de los colectivos de trabajo que la realizan. Además el trabajo científico – investigativo de los estudiantes de la Educación Superior cubana, los mismos contribuyen con sus resultados al desarrollo socioeconómico y científico – técnico del territorio y del País.

En diciembre de 1972 se acordó entre los gobiernos de la URSS y la República de Cuba la colaboración técnica para la rehabilitación de las fábricas niquelíferas y la construcción de una nueva fábrica de Níquel en Punta Gorda.

En agosto de 1973 se elaboró el contrato # 60800 por el Instituto Cubano de Importación para la Minería y la Metalurgia de la República de Cuba y la Asociación Nacional de la URSS “Tsvietmetpromexport”, para la elaboración del proyecto técnico de la fábrica niquelífera de Punta Gorda. Dicho contrato sirvió como base para la proyección de esta fábrica.

El área de construcción de la fábrica se encuentra al norte del yacimiento de mineral de Punta Gorda, provincia de Holguín en la Costa Norte del Océano Atlántico entre los ríos Moa y Yagrumaje, a 4 Km. de la Ciudad de Moa y a 2 Km. del pueblo de Punta Gorda. El puerto marítimo está a unos 3 Km. al noroeste de la fábrica.

El proceso tecnológico de ambas fábricas está basado en el esquema de la lixiviación carbonato – amoniacal del mineral reducido según el cual el mineral oxidado de níquel es reducido selectivamente haciéndolo apto para la lixiviación amoniacal. También en Australia y en Brasil están operando fábricas con este tipo de tecnología Caron.

En las empresas de níquel particularmente las de proceso Carbonato amoniacal (CAROM) particular en las plantas de Hornos de Reducción se realiza el proceso de reducción del mineral (Níquel y Cobalto).

La mezcla de minerales antes de ser sometido a proceso de reducción se somete a un proceso de secado y molienda en la planta de Preparación del Mineral. En esta planta a los minerales se le elimina la humedad hasta un 5 % aproximadamente y se muele hasta una fineza de 0,074 mm de (85 a 87) % de la masa de minerales.

Dicha reducción se realiza en hornos de soleras múltiples con gases obtenidos del petróleo. El horno cuenta con un árbol central el principio de acción del mismo es rotar a todo lo largo del horno. En cada hogar, al árbol central se articulan cuatro brazos que portan dientes o paletas y son los encargados de facilitar el traslado del mineral de un hogar a otro, desde el hogar superior en HO hasta el hogar inferior H16. El movimiento del mineral de un hogar a otro se realiza en forma de zigzag ya que los hogares pares tienen su descarga por la periferia y los hogares impares por el centro. Este árbol tiene

un motor, un reductor y una transmisión cónica donde la rueda conducida coincide con el eje geométrico del árbol.

El mineral después de reducido, es descargado al transportador rotatorio que lo conduce al tambor enfriador de donde sale (con una temperatura de 200°C) hacia las canales de contacto de la PTA. Lixiviación y Lavado. Dicho proceso de reducción se muestra a continuación en la figura 1.1

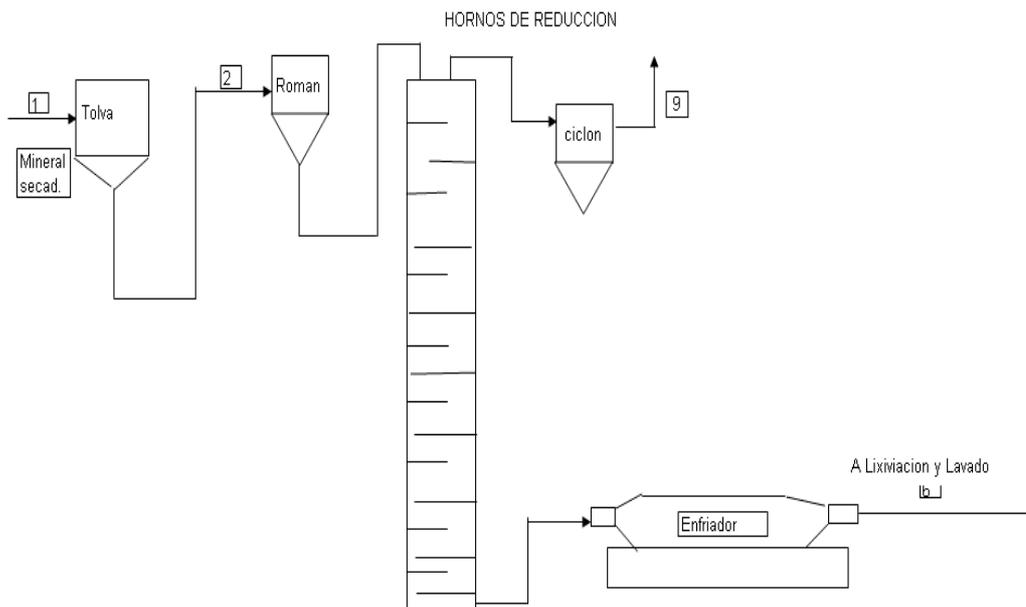


Figura 1.1. Flujo tecnológico de la planta.

Fundamento de la investigación

En las plantas de hornos de reducción del mineral de las empresas “Comandante Ernesto Ché Guevara (ECG) y la René Ramos Latour (RRL)”. Se ha comprobado que en la explotación de estos hornos de reducción ocurren problemas técnicos entre los que se puede destacar la rotura de los árboles centrales de dicho hornos. La avería ocurre al rajarse diametralmente el cuerpo tubular del árbol. Consideramos que la causa está en los años de trabajo a los cuales están sometidos los mismos. Dichas grietas crecen con la presencia de la fatiga del material debido a las condiciones de trabajo de este equipo. Dicha rotura conlleva al paro total del horno y por ende esto trae consigo una disminución en la producción de reducción del mineral, implicando esto un aumento

en el costo de reparaciones de dicho árbol teniendo en cuenta que es mucho mayor que si las condiciones de trabajo fueran normales.

Para el análisis de la resistencia mecánicas de estos árboles se efectuará a través del método de elemento finito (MEF), utilizando la herramienta ANSYS 10.0. Teniendo influencia en esto la diversidad de la forma geométricas de ambos tramos.

El Método de los Elementos Finitos (MEF) ha sido generalizado en la industria para caracterizar la forma de rotura de muchos elementos de ingeniería y constituye una herramienta de cálculo numérico capaz de resolver cualquier problema formulable de la matemática, la física y la mecánica, permitiendo simular y realizar gran cantidad de análisis en componentes y estructuras complejos, difícilmente calculables por los métodos analíticos tradicionales. El objetivo de la investigación fue evaluar, mediante el MEF, el comportamiento de las tensiones en dichos tramos empleados en plantas de hornos de reducción.

Esta problemática ha generado la realización de un estudio profundo desde el punto de vista de la resistencia mecánica que tienen estos árboles para las condiciones de trabajo bajo las cuales se encuentran funcionando, aspectos que generan la ejecución de este trabajo.

Situación Problemática: *Diversidad de tecnología en la fabricación de los tramos de los árboles centrales de los hornos de reducción de la empresa "Ernesto Che Guevara y la René Ramos Latour". Esto se debe al no conocimiento de las propiedades de resistencia del material bajo las condiciones de trabajo que puede soportar él mismo teniendo en cuenta su forma geométrica; en los cuales se producen averías en los brazos de los hornos y en los tramos de los árboles centrales. Esto conduce al incremento de los costos de reparación, mantenimiento, pérdida de la disponibilidad e incremento de los gastos económicos para las Identidades.*

Problema: *Insuficiente conocimiento del comportamiento de la resistencia mecánica en los tramos de árbol central en la planta de horno de reducción de las empresas con Tecnología Caron.*

Objeto de investigación: *Tramos de árboles centrales de los Hornos de Reducción de las Empresas "Ernesto Ché Guevara" y la "Rene Ramo Latour".*



Hipótesis: *Si se caracteriza la resistencia mecánica de los tramos de árboles centrales de los hornos de reducción, es posible estandarizar la fabricación de los mismos en el proceso Caron.*

Objeto de investigación: *Analizar la resistencia mecánica de los tramos de árbol central de los hornos de reducción en las empresas con tecnología Caron.*

Objetivos específicos:

- 1. Proposición de un material que permita aumentar la resistencia mecánica de los tramos de árboles centrales de los hornos reducción.*
- 2. Caracterizar la resistencia mecánica de los tramos de árboles centrales de los hornos de reducción empleando el método de elemento finito.*

Tareas:

- 1. Análisis bibliográfico y establecimiento del Estado del Arte.*
- 2. Estudio de las propiedades de los materiales empleados en la fabricación de los tramos de árbol central, así como las características geométricas.*
- 3. Propuesta de estandarización de un material.*
- 4. Establecer las condiciones de carga y preparación del modelo geométrico.*
- 5. Determinar por el método de elemento finito la distribución de las tensiones y los desplazamientos en los tramos de árbol central.*
- 6. Valoración de los resultados.*

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO- METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

En la tecnología de lixiviación carbonato-amoniaca, los hornos de soleras múltiples representan un importante eslabón de la cadena productiva. En ellos se verifica la reducción de los óxidos de níquel y cobalto mientras que los óxidos de hierro se reducen hasta hierro metálico. En el proceso "Caron", la Planta de Hornos de Reducción se considera entre las de mayor influencia en la finalidad del proceso, ya que la producción del sínter depende directamente de la magnitud del extractable logrado durante la reducción del mineral.

El estudio de los tramos de los árboles centrales de los hornos de reducción es de mucha importancia la realización de una profunda caracterización de los principales procesos que ocurren en el interior de la instalación y del proceso tecnológico del cual forma parte, en tal sentido el **objetivo** de éste capítulo es describir y juzgar el flujo-tecnológico de la Planta a través de las distintas operaciones que se llevan a cabo en cada una de las etapas del proceso, la influencia de las operaciones que intervienen en el buen funcionamiento del horno. Realizar una reseña de los trabajos investigativos acerca de la instalación objeto de estudio, para su posterior diagnóstico técnico.

1.2. Desarrollo de los aceros termo-resistentes

Algunos autores como (Lefèvre 1993; Davis, 1997) plantean que de manera oficial el descubrimiento de los aceros inoxidable se remonta a los inicios del siglo XX, momento en que metalúrgicos de Francia, Alemania, Inglaterra y posteriormente de los Estados Unidos publicaron resultados de investigaciones realizadas en aleaciones de hierro y cromo con bajos contenidos de carbono.

Las investigaciones sobre el empleo de los aceros inoxidable a escala industrial se remonta al período comprendido entre los años 1910 y 1915 (Lula, 1986; Davis 1997), fecha en que se publicaron las primeras monografías relacionadas con la estructura y propiedades de los mismos.

Estudios posteriores relacionados con la composición, estructura y propiedades, el tratamiento térmico y la influencia de los elementos de aleación en los aceros

inoxidables condujeron al desarrollo de las aleaciones endurecibles por precipitación en la década de los 40 por la USSC (United States Steel Corporation). El encarecimiento y escasez del níquel durante la II Guerra Mundial provocó el desarrollo de los aceros austeníticos inoxidables altos en manganeso, en los que gran cantidad o la totalidad del níquel se sustituyó por este importante elemento (Blair, 1992).

El estudio de la influencia del contenido de carbono en la resistencia a la corrosión de los aceros hierro-cromo y los resultados de su investigación revelaron que el carácter de inoxidabilidad de estos materiales era una función del fenómeno de la pasividad (Lefèvre, 1993).

Según Jones 1998 publicó una serie de estudios sobre la estructura y propiedades del acero martensítico 13 % Cr y el ferrítico 17 % Cr con cantidades de carbono desde 0.12 hasta 1.0 %. Estos primeros estudios permitieron la clasificación de acuerdo a la estructura de todos los aceros inoxidables en martensíticos, ferríticos y austeníticos.

Aunque los aceros inoxidables dúplex austenito-ferríticos fueron descubiertos en los años 30, su desarrollo comercial no ocurrió hasta los años 60, período en que los estudios sobre la superplasticidad de estas aleaciones con estructura de granos finos renovó el interés por las mismas (Van Wershoven, 1999)

Hall *et al.*, 1986; Hamano, 1988; Li, 1989; Shah *et al.*, 1990; Brown, 1994 y Mannan *et al.*, 1996, han estudiado las características de fracturas en aceros austeníticos de la serie 300. Sin embargo, a pesar de que estos autores caracterizan y asocian las fracturas a fenómenos de envejecimiento durante ensayos de (fluencia) y a la presencia de fases sigma, sus resultados sólo se asocian a fallas ocurridas en uniones soldadas.

La precipitación de fases endurecedoras y sus efectos sobre las propiedades fueron estudiadas por Hiller y Qiu, 1991. Estos autores establecieron las propiedades termodinámicas de los sistemas Fe-Cr-C, Fe-Cr-Ni-C y Fe-Cr-Mn-N y propusieron modelos termodinámicos para energías de Gibbs de las fases individuales, prestando especial atención a la solubilidad y precipitación de carburos y fases sigma en la austenita bajo distintas condiciones.

Los aceros inoxidable fundidos usualmente se dividen en dos grupos principales: los termo-resistentes, pertenecientes a la serie H y los resistentes a la corrosión, pertenecientes a la serie C.

Dentro del total de la producción mundial de aceros inoxidable, el 52 % pertenece a los aceros austeníticos inoxidable al cromo-níquel. La selección de estos materiales para aplicaciones que implican resistencia a la corrosión a altas temperaturas requiere de un conocimiento profundo sobre los mecanismos y la cinética de la formación de capas superficiales, su composición química, estructura, mecanismos de difusión, etc. Todos estos factores y otros que están estrechamente relacionados con las propiedades mecánicas y estructurales a altas temperaturas permiten la adecuación del acero para usos específicos (De Meyer et al., 2001).

La producción del hierro con el grafito esferoidal se comienza a usar alrededor de los años 50 y a partir de ese momento ha comenzado un uso generalizado del mismo en la industria de la fundición hasta el punto en que ha desplazado al acero en muchos usos y al hierro gris, por ejemplo de esto es que podemos decir que si en los EE.UU. en el año 1965 el por ciento de hierro nodular, solo era un 2%, en el 2002 su valor representa un 31% (Renato, 1986).

La producción del hierro nodular (dúctil o grafito esferoidal) pertenece al grupo más joven de las fundiciones ferrosas, la cual se ha desarrollado ampliamente aumentando la variedad y calidad de las piezas fundidas, desplazando en gran medida la fundición maleable de algunos campos de aplicación. Esto ha sido posible, entre otras cosas, por sus bajos costos de producción y sus excelentes propiedades mecánicas (Renato, 1986).

Sánchez, G. A., López, G. A., Rebollar, M. I., estudiaron a través de experimentos el comportamiento del grafito en la fabricación del hierro nodular, los mismos se basaron en el contenido de carbono que tenía cada muestra para los experimentos, teniendo este gran influencia en la formación del grafito esferoidal. Tuvieron como resultado que mientras menos porcentaje de carbono tenga la aleación influye en la pérdida de la geometría del grafito esferoidal.

La obtención y aplicación de aleaciones especiales de base hierro data desde la segunda mitad del siglo XIX, cuando aún no se tenían conocimientos sobre la estructura de las mismas ni qué relación guardaba esta con las propiedades. En unos inicios, la añadidura de determinados elementos como componentes de la aleación para mejorar las propiedades del hierro, era un proceso incontrolado, carente de fundamentos científicos. Con el desarrollo y aplicación de las técnicas de análisis y microscopía para la caracterización de la microestructura de los metales, se impulsó la realización de las investigaciones relacionadas con la introducción de elementos de aleación para mejorar las propiedades del hierro (Perkins, 1980).

Otros autores como Johansson *et al.*; 1990; Blair, 1992 y Botella *et al.*, 1999; han estudiado la ocurrencia de procesos de precipitación de fases por envejecimiento en productos laminados de aleaciones del sistema Fe-Cr-Ni-Mo e Fe-Cr-Ni-C a escala de laboratorio, sin asociarlos a fenómenos de rotura durante condiciones de servicio.

1.3. Hornos Metalúrgicos

Para un mejor análisis de la técnica tratada hay que tener en cuenta como se pueden clasificar los hornos en dependencia de los procesos para los cuales fueron fabricados.

1.3.1. Breve historia sobre la técnica de los hornos

El primer horno conocido por el hombre fue la hoguera, utilizada en la etapa primitiva. Los hornos especiales surgieron aproximadamente en los años 2000 a.n.e, los cuales no eran más que pequeños crisoles para la fundición de menas ricas de metales con bajo punto de fusión como el cobre, estaño y plomo. (Chang, ISMMMoA).

Los altos hornos para la fundición del arrabio fueron constituidos por primera vez en el siglo XIV en Europa. Prototipos de hornos de reverbero modernos, solamente aparecieron en el año 1700.

Un desarrollo intenso de la técnica de hornos se observa en el siglo XIX. En la URSS esta técnica obtuvo un gran desarrollo después del año 1917. En la URSS, la metalurgia ha superado a los países más desarrollados en una serie de índices técnicos-económicos.

1.3.2. Clasificación de los Hornos metalúrgicos

Los hornos de la metalurgia no ferrosa según (Chang, IMMMA), se pueden clasificar de acuerdo a los procesos para los cuales estos sean fabricados y los mismos se pueden clasificar por los siguientes indicios:

1 Por su aplicación tecnológicas:

- Hornos de secado.
- Hornos de tostación.
- Hornos de fusión.
- Hornos de refinación.
- Hornos de colado.
- Hornos de tratamiento térmico.
- Hornos de calentamiento.

2 Por la fuente de energía:

- Hornos de combustibles carbónicos.
- Hornos que trabajan con la energía desprendida por las reacciones exotérmicas.
- Hornos eléctricos.

3 Por el método de transferencia de calor:

- Hornos en los cuales el calor se desprende directamente en la masa del material calentado.
- Hornos en los cuales el desprendimiento del calor ocurre separadamente del material procesado y se transmite a éste por intercambio de calor.
- Hornos con desprendimiento de calor aislado.

4 Por la forma de la zona de trabajo:

- Hornos con la zona de trabajo vertical – hornos de cubilote.
- Hornos con la zona de trabajo horizontal – hornos de llama, hornos redondos y otros.

5 Por el método de trabajo:

- Hornos de operación periódicas.

6 Por la utilización del calor:

- Hornos recuperadores y regeneradores.
- Hornos con calderas.
- Hornos con calentamiento de la carga.

1.3.3. Hornos más utilizados en la metalurgia no ferrosa

Estos hornos son los que mayormente se utilizan por el extenso campo que estos tienen en el desempeño de los procesos que se realizan en las industrias en nuestro país. Dentro de los mismos se encuentran:

1. Hornos para la fusión de menas, concentrados y semiproductos y también para la refinación de materiales.
2. Hornos para la preparación y fusión de aleaciones.
3. Hornos para el calentamiento y tratamiento térmico de los metales no ferrosos.
4. Hornos para la tostación y secado de la materia prima y semiproductos.

1.3.3.1. Hornos para la fusión de menas, concentrados, semiproductos y para la refinación de materiales

- **Hornos de reverberos:** Tiene la forma de cámara horizontal con las siguientes dimensiones: ancho de 4 – 10m, largo de 10 – 35m y alto de 2 – 4m. La carga inicial se alimenta a través de los orificios situados en la bóveda del horno o a través de ventanas en las paredes laterales. El combustible se introduce por la cabeza y los productos de la combustión se extraen en la parte terminal del mismo. Los productos líquidos de la fusión se extraen del horno a través de orificios especiales, distribuidos a nivel de baño.
- **Horno de cubilote:** Está compuesto de una cuba vertical con un ancho de 1 – 2m, una longitud de 5 – 15m y una altura de 5 – 8m construidas con cajas para el enfriamiento. La carga en pedazos grandes y el combustible lo alimentan por la parte superior del horno y el aire se inyecta por las toberas, distribuidas en la

parte inferior del horno. Los productos de la fusión continuamente lo extraen del crisol delantero.

- **Horno eléctrico:** Su zona de trabajo es análoga a la del horno de reverbero pero es algo más pequeña. A través de la bóveda del horno pasan de 3 – 6 electrodos de carbón con un diámetro de 0.6 – 1.4m, por los cuales se suministra la energía eléctrica a la zona de trabajo del horno. La eliminación de la carga y la descarga de los productos de la fusión se realiza de la forma análoga a la del horno de reverbero.
- **Convertidor:** Es un cilindro horizontal con 2 – 4m de diámetro y 4 – 10m de largo, el que tiene la posibilidad de girar alrededor de un eje horizontal. La meta líquida y los fundentes alimentan al convertidor a través de la garganta, y el aire se inyecta a través de las toberas directamente al baño. Para la descarga del convertidor se gira y los productos salen por la garganta.

1.3.3.2. Hornos para la preparación y fusión de aleaciones

Los hornos para la preparación y fusión de las aleaciones forman un conjunto de hornos de mucha importancia en las industrias; los cuales tienen como función procesar un material deseado para la obtención de una pieza a través del método de fundición. Dentro de estos se pueden destacar:

- **Hornos de inducción:** Están compuestos de un crisol refractario con capacidad de hasta 30 toneladas de aleación los hornos de Inducción están destinados para la fusión de las aleaciones ferrosas y no ferrosas (con crisol de grafito o sin éste). Su principio de funcionamiento está basado en que el calentamiento del metal se produce por una corriente de mucha intensidad y de muy baja tensión. En realidad el metal que se funde representa la bobina secundaria compuesta de una sola espira de un transformador de potencia. Debido a la fuerza electromotriz que se produce entre la bobina primaria y el metal fundido este se encuentra en continuo movimiento, por lo que la estructura del producto fundido resulta muy homogénea.

- **Horno de arco eléctrico:** Está compuesto por un crisol enfriado por agua (cristalizador), construido de la misma composición que el material fundido en el horno, o de cobre. En este tipo de horno, el calor para la fusión del acero se obtiene del arco eléctrico que se produce entre el electrodo y la superficie de la carga metálica. El arco eléctrico es una emisión térmica, que produce una emisión gaseosa ionizada a través del cual pasa la corriente, el desprendimiento de partículas, provoca un gran desprendimiento de energía calórica que se utiliza en calentar y fundir la carga metálica.

1.3.3.3. Hornos para el calentamiento y tratamiento térmico de los metales no ferrosos

Los hornos empleados para el calentamiento y el tratamiento térmico de los metales tienen mucha importancia en las industrias de fabricación de piezas. Cuando los materiales se obtienen por el método de fundición, requieren de una mejora de las propiedades del material en dependencia de las condiciones de trabajo bajo los cuales este sometido.

- **Horno Metódico:** Generalmente tiene la forma de trabajo rectangular y alargada por la horizontal. Las piezas calentadas continuamente se mueven desde la cabeza hasta la zona de descarga del horno por medio de un transportador mecánico. La temperatura del horno metódico por su longitud es desigual y tiene su valor máximo en la parte de descarga de las piezas y los gases salientes se conducen al calentador de aire a través de los orificios situados en la solera del horno.
- **Horno de cámara:** Se diferencia del metódico por sus medidas disminuidas y por la periodicidad en su trabajo, ya que las piezas calentadas se encuentran inmóviles sobre la solera, desde el comienzo hasta el final del calentamiento. La temperatura por toda la zona de trabajo del horno de cámara es igual.

1.3.3.4. Hornos para la tostación y secado de la materia prima y semiproductos

Dentro de esta clasificación se encuentran los hornos más utilizados en las industrias extractoras del níquel los cuales tienen mucha importancia dentro de los procesos de secado y reducción del mineral. Los cuatro tipos más propagados son:

- **Hornos de soleras múltiples:** Es un cilindro vertical de 4 – 8m de diámetro y 4 – 12m de alto dividido verticalmente en soleras horizontales. La carga inicial la suministran en la solera superior y continuamente es agitada de solera en solera por los brazos con rastrillo. El combustible y el aire en el horno lo suministran a través de las ventanas que se tienen en cada solera.
- **Horno para la tostación de cámara fluidizada:** Representa una cámara con 2 – 8m de sección transversal y de 3 – 15m de altura. El aire entrante en el horno a través de la solera con un gran número de orificios, mantiene el material procesado en estado de movimiento continuo muy parecido a un líquido en estado de ebullición.
- **Máquinas de aglomeración:** Compuesta por una estera que se mueve continuamente, la cual tiene la longitud de 10 – 15m y un ancho de 1 – 4m. La carga se suministra en forma de capas uniformes sobre las superficies de las parrillas en la cabeza de la máquina; el aire, necesario para el proceso de tostación, se succiona a través de la capa de material sobre las parrillas.
- **Hornos de tambor rotatorio:** Es un cilindro de 2 – 5m de diámetro y 20 – 200m de largo, el cual rota sobre un eje bajo un pequeño ángulo de inclinación con respecto a la horizontal, la carga y el combustible se suministran al horno generalmente a contracorriente.

1.4. Horno utilizado para el proceso de reducción del mineral

Los hornos utilizados para el proceso de reducción del mineral en las empresas de tecnologías Caron son los de soleras múltiples. El principio y funcionamiento de estos hornos permiten con gran facilidad proceso de reducción del mineral.

1.4.1. Horno de soleras múltiples (225-HR- 205)

Según (Rodríguez, Palacio y Estévez, 2007), el horno está compuesto de un cilindro metálico vertical revestido interiormente con chamota o alta alumina, instalaciones de agitación, alimentación, descarga y cámara de calentamiento.

El cuerpo metálico de diámetro entre 4 – 8 m, el horno tiene una altura de 3 – 15 m y un espesor de 10 –12 mm. Por la altura del cuerpo se sostiene una gran cantidad de ventanas de arrabio, distribuidas circularmente frente a cada solera. El revestimiento del horno está compuesto por una capa cilíndrica de chamota, con ladrillos, de un espesor de 150 – 250 mm, y una capa termoaislante de 10 – 50 mm, distribuidas entre el cuerpo y el revestimiento de chamotas.

Las soleras tienen forma de bóvedas esféricas (arqueadas) de piezas de chamota, de un espesor de 150 – 250 mm en las soleras se encuentran orificios para el paso de los gases, distribuidos alternamente por el centro y la periferia. El número de soleras puede ser 6 – 16.

La carga del horno se alimenta por la parte superior por la ayuda de un alimentador conectado a una romana. La mezcla de minerales, se recibe en forma de material movidizo a la temperatura de 40°C, entra al horno a la solera H0. En las primeras 4 soleras ocurre el secado del mineral, en las siguientes se le elimina la humedad intrínseca del mineral y ocurre el proceso de reducción. En la solera 16 ocurre un enfriamiento de la mezcla de minerales. Los gases salientes del horno pasan a través de una tubería especial a los ciclones y electrofiltros.

Los quemadores para el calentamiento del horno trabajan con masut y se distribuyen por la altura y su número lo determina el carácter del proceso y las dimensiones del horno. Una característica más detallada de estos hornos se puede ver en el anexo #1 (tabla 1.1).

1.4.2. Ventajas y desventajas de los Hornos de soleras múltiples

Los hornos de soleras múltiples tienen mucha diferencia respecto a los demás ya que estos forman parte del grupo que se utiliza con mayor frecuencia en las industrias extractoras del níquel los cuales tienen mucha importancia dentro de los procesos de secado y reducción del mineral.

Ventajas

- Dentro de las ventajas de este horno podemos citar las facilidades de regulación del perfil de temperatura, lo que permite lograr un aumento gradual de la misma mejorando las extracciones para los minerales silicatos.
- En el se conjugan las dos formas de tostación, en capa y en suspensión, que ocurre en los momentos de la caída que es donde se obtiene mayor contacto entre las fases. Por esto la altura de los hogares es variable, para que el tiempo de contacto sea el mayor posible.
- El arrastre de polvo en este equipo es pequeño en comparación con los hornos de cama fluida. Por este motivo no es necesario reciclar mucho polvo.

Desventajas

- Las desventajas fundamentales de este horno son la cantidad tan grandes de piezas cambiables (brazos y dientes, refractarios de cámaras, piezas de quemadores, etc.) que ocasionan pérdida de tiempo y de eficiencia.
- Otra de las desventajas es la baja productividad, que es de 17 t/h, mientras que en equipos más modernos llega hasta 30 t/h. Desde el punto de vista tecnológico, la reacción en la cama de mineral ocurre sustancialmente en la superficie de contacto y en el material que está en la profundidad de este, gracias a la introducción del petróleo aditivo que en este caso es muy determinante como agente reductor para una buena reducción.

1.5. Principio y funcionamiento de los Horno de soleras múltiples (225-HR- 205)

El objetivo del proceso que se realiza en esta planta según (Rodríguez, Palacio y Estévez, 2007) es reducir el óxido de níquel a níquel metálico, haciéndolo apto para la lixiviación amoniaca. La misma cuenta con la instalación de 24 hornos, 12 transportadores rotatorios e igual número de enfriadores como equipos fundamentales.

El mineral dentro del horno es sometido al proceso de reducción el cual se realiza en los hornos de soleras múltiples (17 hogares) con gases obtenidos del petróleo.

El horno cuenta con un árbol central que rota a todo lo largo del horno. En cada hogar, al árbol central se le articulan cuatro brazos que portan dientes o paletas y son los

encargados de facilitar el traslado del mineral de un hogar a otro, desde el hogar superior en HO hasta el hogar inferior en H16. El movimiento del mineral de un hogar a otro se realiza en forma de zigzag ya que los hogares pares tienen su descarga por la periferia y los hogares impares por el centro.

Además, el horno dispone de 10 cámaras de combustión dispuesta en los hogares 6, 8, 10, 12 y 15 con quemadores de petróleo de alta presión, que son los encargados de producir los gases para el calentamiento del mineral.

Los gases que salen del horno arrastran consigo partículas muy finas de mineral, las cuales se hace necesario recuperar para evitar mayores pérdidas en el proceso. Para ese proceso la Planta cuenta con un sistema de limpieza de gases formado por un grupo de seis ciclones en cada horno y doce electro-filtros. El mineral recuperado en los ciclones cae por gravedad al hogar HO. El mineral que se recupera en los electrofiltros por medio de transporte neumático, es devuelto a la tolva de producto final de la sección de molienda.

El mineral después de reducido, es descargado al transportador rotatorio que lo conduce al tambor enfriador de donde sale (con una temperatura de 200°C) hacia los canales de contacto de la PTA. Lixiviación y Lavado. Ver anexo 2 (figura 1.1).

1.6. Factores que Influyen en la Operación del Horno

Para analizar desde el punto de vista la operación de los hornos según (Rodríguez, Palacio y Estévez, 2007), hay que tener en cuenta diferentes factores que tienen gran influencia sobre los mismos; los cuales accionan de forma diferente, dentro de los cuales se encuentran:

1. La temperatura.
2. La granulometría.
3. Composición química de la materia prima.
4. Concentración de gases.
5. Número de hogares.
6. Estabilidad en la alimentación.
7. Tiempo de retención.

1.6.1. Influencia de la Temperatura

Este es un parámetro fundamental en todo el proceso pirometalúrgico, ya que la temperatura facilita el cambio de estado o el debilitamiento de la estructura cristalina. El perfil de temperatura se mantiene mediante la utilización de quemadores de petróleo que se encuentran en las cámaras de combustión. En éstas se trata de mantener una relación aire-petróleo que garantice la combustión incompleta, a la vez ayuda a enriquecer la atmósfera reductora dentro del horno, además en los hogares 4 y 6 se introduce aire secundario proveniente de las camisas de enfriamiento en los hogares 4 y 6 para quemar el CO residual. Debido a esta reacción exotérmica se produce una cantidad de calor adicional que contribuye al calentamiento del mineral y a mantener el perfil térmico del horno.

1.6.2. Influencia de la Granulometría

Por este ser un proceso heterogéneo la granulometría influye determinadamente en los buenos resultados de reducción. Las reacciones ocurren fundamentalmente en la línea divisoria de las fases y la velocidad de la reacción está determinada por la penetración del gas al interior de la partícula. Si estas son pequeñas, aumentará la superficie activa del mineral, será mayor el contacto entre las fases, lo que incide directamente en la conversión de la reacción.

1.6.3. Composición Química de la Materia Prima

La composición química de la materia prima influye directamente en los resultados de la reducción. Atendiendo a esta se fijan las temperaturas en el horno y el régimen de calentamiento de la mezcla de minerales, así por ejemplo, cuando la mezcla de minerales tiene su contenido de hierro bajo, el régimen de temperatura debe ser más alto, así como la concentración de reductores debe ser elevada para reducir el níquel en el momento del debilitamiento de los cristales por la expulsión de agua cristalina.

1.6.4. Concentración de Gases

La reducción se lleva a cabo mediante el contacto de los gases reductores con la mezcla de minerales. Ambas fases se ponen en contacto en la cama de mineral y las caídas de un hogar a otro.

Al encontrarse el petróleo aditivo en hogares con temperaturas superiores a 350°C, comienza la descomposición del mismo, formándose el CO y H₂ una vez reaccionado el carbono activo en la primera etapa de la cadena de reacción química, además la atmósfera reductora es enriquecida por el gas producto de la combustión incompleta en los quemadores de petróleo. La concentración de los gases influye directamente en la conversión del níquel.

1.6.5. Número de Hogares

Este ha sido un factor de importancia en el desarrollo de los hornos modernos, ya que fue detectado que el número de caídas de un hogar a otro influía directamente en los resultados de la reducción debido a que en el momento de las caídas ocurre mayor contacto entre las fases, y las partículas son bañadas completamente por el gas, calentándolas a las temperaturas indicadas y reduciendo el níquel. La reducción en la cama de mineral lleva el peso de la reducción alrededor de un 70% de la misma, gracias al petróleo aditivo.

1.6.6. Estabilidad en la Alimentación

La inestabilidad en la alimentación al horno afecta seriamente el perfil de temperaturas, y por ende la operación del mismo, ya que todas las condiciones son fijadas para el tonelaje a procesar, y si en este tiempo al horno se les suministra más mineral que el fijado, la temperatura comenzarán a bajar y si ocurre lo contrario la temperatura aumentan y ambas situaciones no son conveniente para el proceso ni para una buena estabilidad en la operación.

1.6.7. Tiempo de Retención

En el horno de hogares múltiples es un factor que incide directamente en los resultados de la reducción por el grado de terminación de la reacción la cual depende del calentamiento gradual de la mezcla de minerales y del grado de relación de esta con los reductores gaseosos.

1.7. Características y funcionamiento del árbol central de los hornos de reducción

Para hablar de las características y funcionamiento del árbol hay que definir la diferencia que existe entre el termino eje y el termino árbol, ya que estos son confundidos con frecuencia.

El **eje** sirve para sostener los elementos giratorios. Los ejes según (Dobrovolski, 1980) pueden ser inmóviles respecto a los elementos montados en ellos o pueden girar junto con ellos (en este caso el eje se puede fabricar de una pieza con ellos).

Los **árboles** a diferencia de los **ejes**, además de sostener los elementos giratorios transmiten el par de torsión; por consiguiente, los árboles resultan cargados no sólo por los esfuerzos flectores sino también por el par de torsión que tiene lugar por toda la longitud o en algunos tramos del árbol.

Los **árboles** y los **ejes** pueden ser enteros y huecos. En los últimos años los árboles huecos se emplean más y más. Ante todo, esto se explica por la disminución esencial de la masa de la pieza y por la menor sensibilidad a la concentración de esfuerzos.

1.7.1. Tipos de árboles

Existe mucha diversidad en cuanto a las formas geométricas de los árboles por los que no todos se pueden clasificar de la misma forma. Teniendo en cuenta su forma geométrica se pueden clasificar en: para un mejor análisis de las siguientes clasificaciones que a continuación se muestran: Para un mejor análisis ver anexo #3.

- **Árboles axiales:** estos árboles se clasifican según su forma geométrica en tres grupos los cuales son:
 1. Rectos.
 2. Acodados.
 3. Flexibles.
- **Árboles transversales:** los mismos teniendo en cuenta su forma geométrica se pueden clasificar en :
 1. Circular.
 2. Acanalados.
 3. Poligonal.

1.7.2. Características del tramo 2030 de la ECG y el tramo B-159 de la RRL

Se deben de analizar los tramos por individual ya que los dos tienen características diferentes. Teniendo en cuenta que ambos trabajan bajo efectos similares se pueden destacar las siguientes características. (Rodríguez., Palacio., Estévez, 2007). Para una información más detallada sobre estos tramos ver anexo #4 (tabla 1.3 y 1.4).

1.7.3. Funcionamiento del árbol

Después que la mezcla de minerales es secada y molida según (Rodríguez., Palacio., Estévez, 2007), se transporta de forma neumática a los hornos de reducción donde la función principal de los árboles centrales de estos hornos es remover este mineral. El movimiento del árbol central se garantiza por una transmisión cónica accionada por un electromotor de 20 kW que proporciona una frecuencia de rotación de 1.4 a 1.5 rev/min. A este árbol se le articulan 68 brazos los cuales están dispuestos en 17 hogares. Estos brazos tienen incluidos dientes o paletas inclinadas con las que mediante la rotación del árbol central facilitan el traslado de la mezcla de minerales de un hogar a otro por la periferia o por el centro del horno en forma de zigzag, ya que los hogares pares tienen su descarga por la periferia y los hogares impares por el centro.

En el árbol central los tramos se parten por diferentes causas, que a continuación se relacionan: para ver el motivo de dichas partiduras ver anexo #5 (figuras 1.3 – 1.8).

1. Cuando el esfuerzo a que está sometido es mayor que la resistencia mecánica del material del árbol, esto puede ser ocasionado por un tranque en algunas de las partes móviles del árbol.
2. Puede estar provocado también por defectos de fundición no visibles, otro factor que incide en este fenómeno es la acción directa del quemador de la cámara de combustión sobre el árbol.
3. Una sobrecarga también puede afectar en este caso, ya sea en el momento de arranque si existe algún tranque en el árbol.
4. El tiempo de vida útil del árbol, ya que la estructura de la red cristalina puede variar producto a la acción del calor y los gases y pasar a estructuras más débiles, favoreciendo el incremento de tensiones en el metal.

1.7.4. Definición de los materiales de ambos tramos de árboles centrales de "ECG" y la "RRL"

El material de los tramos de árbol central de la empresa ECG es de la (marca ЧН1МШ, según la norma (Gost 1849 - 87) los mismos según su composición son hierros aleados. Para la fabricación de los tramos de la empresa RRL se rigen por la misma norma, para la selección del material (B4-50-2) estas aleaciones presentan propiedades similares, solamente cambia el diseño, o sea, la geometría de la pieza lo que influye de manera significativa a la hora de aplicar la tecnología de fundición debido a que no son los mismos procedimientos en cuanto a la fabricación de los modelos. Para conocer más detalladamente las características de ambos materiales utilizados en los tramos de ambas fabricas ver anexo #6 (tabla 1.5 - 1.8).

Teniendo en cuenta las características de estos dos materiales y la variación que existe en las formas geométricas de ambos tramos de la pieza. Debido al elevado precio que requiere la obtención de los componentes para lograr dichas aleaciones. Es necesario realizar la homogenización de un material que cumpla con las características mecánicas deseadas para dicha fabricación y que el costo de obtención sea mínimo. El mismo debe de cumplir todos los aspectos, quedando también homogenizada la geometría de ambas piezas a fabricar.

El material que se quiere homogenizar para la fabricación de ambos tramos es el **hierro nodular**. Con la homogenización de este material se busca la disminución del precio de fabricación de los mismos, también se tiene en cuenta las buenas propiedades mecánicas que este material presenta. Las propiedades de este material se pueden percibir en el anexo #7 tabla (2.1 y 2.2).

En la actualidad esta producción según (Enrique, 1986), ocupa uno de los lugares más importantes entre los hierros fundidos de alta resistencia. Millones de toneladas de este material se funden, anualmente, en los países desarrollados. El incremento de su producción se debe entre otras cosas, a que el hierro nodular supera, con amplitud, al hierro fundido gris y en algunos casos, también, a algunos aceros fundidos en cuanto a las propiedades mecánicas se refiere.

El hierro fundido gris es un material muy explotado en la industria de la construcción de maquinarias por la gran resistencia al desgaste que posee. Sin embargo, es indeseable cuando se trata de fabricar piezas que necesitan resistir choques o impactos. Esta propiedad negativa se debe, principalmente, a la influencia que ejerce la forma del grafito en su estructura. En está el grafito aparece en forma de láminas, las cuales están desprovistas de una buena resistencia. Estas láminas son como fisuras que dan lugar a una matriz muy discontinua, lo que hace que se debilite considerablemente.

Una pequeña cantidad de magnesio puede precipitar el grafito en una forma compacta de esferas o esferoides. Se obtienen, entonces, una estructura de grafito esferoidal o nodular, la cual ofrece una resistencia mecánica mucho más elevadas que la que se obtiene por fundición corriente. Posee, además, cierta ductilidad, es decir, soporta, sin romperse, una deformación permanente.

1.8. Influencia de las Altas y Bajas Temperaturas en los tramos de los árboles centrales

La temperatura y el tiempo contribuyen de manera aislada a la disminución de la resistencia de los elementos. Sin embargo, para el caso que se analiza, estos factores actúan de forma simultánea.

Durante las operaciones de los hornos las temperaturas en los tramos de los árboles alcanzan valores que favorecen termodinámicamente la precipitación de estos bajo los efectos del envejecimiento de la aleación como resultado del mantenimiento de las temperaturas en valores más o menos estables durante períodos prolongados de tiempo.

En cambio, a temperaturas elevadas la resistencia mecánica depende mucho de la magnitud y velocidad de aplicación de la carga y del tiempo de exposición. A elevadas temperaturas, gran cantidad de materiales metálicos se comporta como materiales viscoelásticos, al ser sometidos a la acción de cargas,

Las altas temperaturas de los hornos propician que se añada energía térmica de activación a las oscilaciones de los átomos alrededor de su núcleo, disminuyendo la energía de enlace en las fronteras sigma/carburos. De esta manera, los átomos se desprenden con mayor facilidad de la estructura cristalina, originándose vacíos que al

difundirse y concentrarse bajo los efectos de las elevadas temperaturas y cargas de trabajo, se convierten en focos potenciales para el surgimiento de grietas.

Los efectos de sobrecargas se acentúan bajo la influencia del incremento de las temperaturas de operación, pues, los aumentos en la carga requieren aumentos en los valores de temperatura para mantener las condiciones de reducción, los que en ocasiones pueden alcanzar los 850 °C.

La influencia de la temperatura según (Callister y Johm, 1991) en los materiales es importante y condiciona considerablemente su comportamiento.

La temperatura no sólo provoca cambios instantáneos en el comportamiento de los sólidos, sino también afecta su comportamiento reológico, activando mecanismo de deformación viscosa.

1.9. Métodos de elemento finito

El método de elementos finitos no es nuevo. Su desarrollo y éxito se expande con el creciente desempeño de las computadoras digitales.

Walter Ritz (1878–1909), físico Suizo fue el primero en formalizar el método de elementos finitos. Él propuso que las frecuencias de las líneas espectrales de los átomos podían ser expresadas por diferencias entre un relativamente pequeño número de “elementos”. Desarrolló la formulación matemática del (MEF), con base en el cálculo variacional. El método de Ritz es también conocido como variacional o formulación clásica.

El ingeniero ruso Boris G Galerkin (1871-1945) incorporo el cálculo matricial al método de elementos finitos. Publicó sus primeros trabajos en base al método clásico durante su prisión en 1906 por orden del zar en la Rusia prerevolucionaria. En muchos textos rusos el método de elementos finitos de Galerkin se conoce como método de Bubnov-Galerkin. Él publicó un trabajo usando esta idea en 1915. El método también fue atribuido a Bubnov en 1913.

Zienkiewicz y Cheung en 1967 publicaron el primer libro sobre elementos finitos.

1.9.1. Fundamentos del método de elemento finito

En esencia se trata de una técnica que sustituye el problema diferencial por otro algebraico, aproximadamente equivalente, para el cual se conocen técnicas generales de resolución. Para ello hace uso de la "discretización" o subdivisión de una región sobre la cual están definidas las ecuaciones en formas geométricas simples denominadas elementos finitos.

El Método de los Elementos Finitos (MEF) ha sido generalizado en la industria para caracterizar la forma de rotura de muchos elementos de ingeniería y constituye una de las herramientas de cálculo numérico capaz de resolver cualquier problema formulable de la matemática, la física y la mecánica, permitiendo simular y realizar gran cantidad de análisis en componentes y estructuras complejos, difícilmente calculables por los métodos analíticos tradicionales.

El método ha sido aplicado con notable éxito a prácticamente cualquier área de la ciencia e ingeniería:

1. Problemas de estructuras.
2. Mecánica de fluidos.
3. Propagación de ondas.
4. Problemas de conducción del calor.
5. Procesos de difusión-convección.
6. Procesos de reacción-difusión.
7. Problemas de campos electromagnéticos.

Una de las ventajas de este método es su facilidad de implementación en un programa computacional, que a su vez es una condición básica para su utilización ya que para el tratamiento de un problema en particular debe efectuarse un número muy elevado de operaciones para resolver sistemas algebraicos del orden de cientos o miles de ecuaciones.

Entre las grandes ventajas de los elementos finitos frente a otros métodos se pueden destacar las siguientes:

- Las geometrías complicadas y las condiciones de frontera pueden manipularse con mayor facilidad.
- Los fundamentos matemáticos desarrollados durante los años 70 y 80 no han conocido el mismo desarrollo en otros métodos.
- Permite construir software de propósito general.

1.10. Transformaciones realizadas en los tramos de árbol central

Durante el transcurso de la investigación se hizo referencia a diferentes fuentes bibliográficas, su estudio estuvo dirigido en 2 ramas esenciales: los trabajos que analizan el tema de los tramos de árbol central de los hornos de reducción de mineral en las empresas con tecnología Caron; que desde el punto de vista científico, técnico y práctico que se han efectuados desde el comienzo de esta tecnología Caron.

Uno de los aportes considerable de esta primera parte lo facilito el manual de operaciones de la planta de hornos de reducción de la Empresa "ECG" abordado por (Rodríguez., Palacio., Estévez, 2007); en el mismo hacen un registro de todos los equipos que existen en la planta, el funcionamiento de cada uno, sus características, el flujo tecnológico del proceso de reducción del mineral entre otros.

Otro documento de gran utilidad fue el documento elaborado por los ingenieros Hernández Costa, Gómez Gonzáles, Córdova Téllez y Antonio Urgellés (2004). Los mismos expresan algunos de los problemas más usuales que facilitan la rotura de los tramos de árbol central de los hornos de reducción de las empresas con tecnología Caron; ya que las aleaciones con que están hechos, al soportar temperaturas superiores a los 600°C, sus propiedades mecánicas disminuyen en un 30%.

Trabajo de diploma por el autor (Velásquez R. A. 2002), donde analiza la fragilización de la aleación HH por la precipitación de la fase sigma. En el mismo efectúa el cálculo de resistencia para dicha aleación y la propuesta de sustitución de esta aleación por la HK-40 por sus propiedades; introduciéndose algunas modificaciones en el diseño y la tecnología de fundición. Estas modificaciones han mejorado las características metalográficas y el comportamiento mecánico de los brazos ante las elevadas

temperaturas y condiciones de carga impuestas durante las operaciones en los hornos de reducción. Efectúa un análisis de todos los aspectos de ambas aleaciones.

1.11. Conclusiones del Capítulo I

1. En la Planta de Hornos de Reducción de la Empresa "ECG" existe poca información respecto a los tramos de árbol central de los hornos de reducción. Influyendo esto en la toma de datos técnicos, en la clasificación de los árboles y en la consolidación de las averías producidas lo que dificulta la realización del trabajo investigativo.
2. Las propiedades para consultar a partir de la necesidad de la descripción y caracterización del objeto de estudio para definir sus principales regularidades a través del empleo de métodos científicos de investigación posibilitan la ejecución ordenada del proceso investigativo.
3. Se relacionan los criterios que definen el comportamiento de dicho sistema.

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

Este capítulo está encaminado para el análisis de la resistencia mecánica. Asumiendo para dicho análisis las mismas condiciones de trabajo para ambas empresas, para así demostrar cual es la tecnología más factible quedando homogenizado la forma geométrica y el material para ambas empresas.

En el campo de las aleaciones metálicas no es posible realizar investigaciones con resultados fiables cuando no se cuenta con el equipamiento requerido y suficiente información que propicien las especificaciones de entrada de los modelos; así como la composición, estructura y propiedades de los materiales analizados.

Partiendo de las investigaciones realizadas demuestran que la rotura de las piezas de las máquinas, en la inmensa mayoría de los casos, ocurre como consecuencia de la aparición de grietas de fatiga ver (anexo #5). Las cuales tienen gran influencia sobre el aumento de las roturas en los tramos de árbol central de las empresas con tecnología Caron; dichas roturas han provocado divergencia en cuanto a la fabricación y geometría de la pieza analizada. Teniendo mayores incidencias de roturas en la Empresa "RRL". Por tanto el **objetivo** de este capítulo es establecer el procedimiento de cálculo para la caracterización de la resistencia mecánica en los tramos de árbol central de los hornos de reducción del mineral. Definición de las características químicas y mecánicas del material a homogenizar para los tramos de árbol central, también plantear la metodología de la simulación por el Método de los Elementos Finitos para un mejor análisis de la resistencia mecánica.

2.2. Materiales y Métodos

Los materiales son los encargados de facilitarle las condiciones de trabajo al operario ya que a través de estos se pueden obtener valores que no tienen otra forma de medirse o conocerse.

Los métodos son los que nos proporcionan las variantes para desarrollar una investigación hacia un objeto o pieza deseada.

2.2.1. Selección y preparación de muestras

Las informaciones obtenidas de los registros de datas y averías de la Planta de Hornos de Reducción de la Empresa "Ernesto Ché Guevara", el seguimiento prestado a la durabilidad de un lote de tramos de árboles centrales previamente marcado desde la puesta en explotación hasta la rotura y los resultados obtenidos en investigaciones previas sobre la durabilidad de componentes de hornos de reducción realizadas por Velázquez y Mariño, 1996 y Girón et al., 1997, permitieron establecer el criterio de decisión a tomar en cuanto a los hogares de interés para el análisis a partir de la frecuencia de roturas manifestada.

Según las investigaciones realizadas, las zonas de roturas más frecuentes y con menor durabilidad mostradas por los componentes son los hogares del 5 - 15, mientras que en los hogares del 0 - 4 y el hogar 16, los índices de frecuencia de roturas compilados son mucho más bajos, siendo más prolongada la durabilidad de los tramos de árboles centrales.

Se analizaron muestras de 2 probetas con la aleación homogenizada, a las mismas se le efectuó un análisis metalográfico y fotográficos. Para conocer el comportamiento del grafito bajos condiciones de trabajo semejante.

La preparación de las muestras para la caracterización metalográfica se realizó según los procedimientos establecidos en las normas NC 10-56:86 y ASTM E3-95.

2.2.2. Análisis químico

Se comprobó la composición química de las muestras para verificarlas con los estándares y establecer su correspondencia con las aleaciones a investigar. El análisis químico se realizó empleando un espectrómetro de Masa ESPECTROLAB 230 con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón en el Laboratorio del Taller de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel. Los resultados obtenidos se pueden ver en el (anexo #7).

2.2.3. Análisis de falla

El análisis de falla realizado incluye el examen fractográfico, la caracterización microestructural y el microanálisis de las superficies de fractura. Para el establecimiento del tipo de falla a elevadas temperaturas se realizó el análisis fractográfico y la comparación de las condiciones de operación de los elementos con los datos e informaciones disponibles de las propiedades físico-químicas y mecánicas de las aleaciones.

Tales exámenes son suficientes para la mayoría de las investigaciones de falla, pero para el caso tratado, se requiere de una valoración más exhaustiva y completa debido a que conjuntamente con los elevados esfuerzos, también las temperaturas y el tiempo de exposición provocan inestabilidades en la estructura metalúrgica de la aleación durante los servicios.

2.2.3.1. Examen fractográfico

Los exámenes fractográficos para la caracterización de las fracturas, de las macro y microgrietas se realizaron mediante la inspección visual.

2.2.3.2. Microanálisis de las superficies

Los microanálisis se realizaron en 4 puntos distintos de las microestructuras de interés y se registraron en la PC para posteriormente cuantificar las fases presentes en la microestructura a partir del análisis de imagen asistido por computadora (IAC). La cantidad de ferrita presente en el acero, se determinó siguiendo las reglas y procedimientos de la Norma NC 04-77:86.

2.2.3.3. Análisis microestructural

Para la caracterización microestructural de las muestras se utilizaron las técnicas de microscopía óptica, microscopía electrónica.

Se analizaron, conjuntamente con las muestras tomadas 3 probetas de una aleación semejante a las que esta en funcionamiento las mismas fueron envejecidas entre 10 000 y 15 000 horas durante las operaciones de los hornos para realizar un estudio comparativo entre la microestructura de estas dos aleaciones y confrontar los efectos

de las altas temperaturas de trabajo de los hornos sobre la estabilidad estructural de ambas.

2.2.4. Análisis de resistencia mecánica

Los cálculos de resistencia en los tramos de árbol central se realizaron teniendo en cuenta las condiciones de operación, la geometría y las cargas a las que están sometidos. Se compararon las tensiones actuantes con las admisibles del material homogenizado (hierro esferoidal), asumiendo un coeficiente de seguridad de 3.

Se empleó el paquete de software ANSYS V.10 para el análisis por el MEF desarrollando el estudio en dos partes; en la primera se hizo la simulación de los tramos de la ECG con sus dimensiones reales y en la segunda se analizó el tramo de la RRL, tramos de árboles centrales, ya descritos anteriormente. Se desarrolló la secuencia de pasos siguiente:

- Obtención del modelo geométrico.
- Aplicación de las condiciones de fronteras y de cargas.
- Mallado.
- Búsqueda de la solución (solver).
- Realización del post procesamiento y obtención de las respuestas en el dominio de las tensiones, los esfuerzos y los desplazamientos.

2.2.5. Métodos de investigación

Para el desarrollo de la investigación se emplearon los siguientes métodos investigativos:

1. Método de investigación documental o bibliográfica para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con los tramos de los árboles centrales de los hornos de reducción del mineral.
2. Método de investigación numérico-computacional para la simulación del comportamiento de los tramos de los árboles centrales de los hornos reducción bajo condiciones similares a las de operación.
3. Método de investigación experimental para describir y caracterizar los tramos de los árboles centrales de los hornos de reducción y sus principales regularidades.

2.3. Influencia del medio exterior en la resistencia a la fatiga

El medio exterior, en el cual trabaja una pieza dada, ejerce considerable influencia en su resistencia a la fatiga. La acción del medio a tensiones variables se manifiesta sobre los metales en forma de fatiga por la **corrosión** y por la **adsorción**. (Dobrovolski, 1980).

2.3.1. La fatiga por la adsorción: es el descenso de la resistencia de los elementos de máquinas, el cual tiene lugar en los medios tensoactivos o surfactivos (que no actúan químicamente sobre el metal).

2.3.2. La fatiga por la corrosión: es un proceso más peligroso por ser un fenómeno que reduce la resistencia a la fatiga de los elementos de máquinas en medios corrosivos (que atacan al metal).

Muchas de las piezas principales de las máquinas trabajan en todos medios. Es sabido que el deterioro prematuro de los árboles portahélices, las paletas de las turbinas, los vástagos de los motores Diesel y otras piezas, se debe a la fatiga por la corrosión. La resistencia mecánica por fatiga en estos medios disminuye considerablemente

2.4. Material propuesto para la fabricación de ambos tramos

En la introducción de la producción del hierro nodular (Callister y Johm, 1991), expresan que adicionando una pequeña cantidad de magnesio o cerio en el hierro fundido gris antes de la fundición se produce la formación de otra aleación con diferente microestructura y conjunto de propiedades mecánicas. En esta mezcla se forma la grafito, con nódulos o partículas en forma de esferas. La aleación resultante se llama hierro nodular (dúctil o grafito esferoidal).

La fase matriz que se forma es perlita o ferrita, dependiendo del tratamiento térmico. Ella normalmente es una perlita para una pieza bruta de fundición. Sin embargo sometida a un tratamiento térmico durante horas a una temperatura de 700 °C (1300°F), nos da una matriz Ferrita.

Las piezas fundidas con esta aleación son más fuerte y más dúctil que en el caso del hierro fundido gris.

Por esa razón el hierro fundido dúctil tiene características mecánicas que se aproximan a las del acero.

El mismo es un hierro aleado marca (FeNiMo) según la norma GOST 1849-87 (hierro nodular Ni – Mo con matriz Perlita – Cementita y grafito nodular), la temperatura de fusión es de 1370°C, la temperatura de vaciado es de 1450 - 1470°C, cuya composición química y las propiedades mecánicas que presenta dicha aleación se muestran en el anexo #7.

2.5. Cálculo de la resistencia Mecánica de los árboles de los hornos para ambas Empresas

Resistencia del tramo de la Empresa "ECG" teniendo en cuenta las características del material homogenizado. Apoyándome en las ecuaciones matemáticas expuestas por (Stiopin, 1985) para darle solución a las piezas sometidas a torsión o fatiga. Dichas expresiones matemáticas se muestran a continuación.

2.5.1. Cálculo del momento torsor para los dos Tramos

Para desarrollar el cálculo del momento torsor me apoye en la metodología aplicada por P. A. Stiopin (1985), donde el mismo plantea que el torque depende de la potencia del motor y la velocidad de rotación con la que trabaja por lo que dicha ecuación queda expresada de la siguiente forma:

$$M_{tor} := \frac{N}{\omega} \quad \text{Nm} \quad (2.1)$$

donde: M_{tor} es el momento torsor actuante Nm

N es la potencia del motor en kw.

ω es la frecuencia de rotación en rad/s.

Para convertir la velocidad de rotación en rad/s se utiliza la expresión siguiente:

$$\omega = \frac{n \cdot \pi}{30} \quad \text{rad/s} \quad (2.2)$$

donde: n es la frecuencia de rotación en rev/min.

2.5.2. Obtención del módulo de resistencia a la torsión para un cilindro hueco

Según la bibliografía P. A Stiopin (1985) se puede obtener la ecuación para el cálculo del módulo de resistencia a la torsión para un cilindro hueco, el mismo tiene en cuenta la dimensión del cilindro; dicha ecuación queda expresada de la siguiente forma:

$$wt := 0.2 \cdot D^3 \left(1 - \frac{d^4}{D^4} \right) \quad \text{cm}^3 \quad (2.3)$$

donde: D es el diámetro exterior de la pieza.

d es el diámetro interior de la pieza.

2.5.3. Tensión máxima al cizallamiento

Para efectuar el cálculo de la tensión máxima al cizallamiento se debe de tener en cuenta que esta depende del momento torsor actuante y del módulo de resistencia a la torsión, la misma queda expresada de la forma siguiente según P. A Stiopin (1985).

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{M_{tor}}{\omega_t} \quad \text{kgf/cm}^2 \quad (2.4)$$

donde: ω_t es módulo de resistencia a la torsión en cm^3 .

Mtor es el momento torsor calculado en Nm.

2.5.4. Condición de resistencia

Según P. A Stiopin (1985) expresa que para el análisis de una pieza sometida a torsión se debe de cumplir la siguiente condición de resistencia, teniendo en cuenta la tensión admisible del material analizado. Dicha condición queda expresada de la siguiente forma:

$$\tau_{m\acute{a}x} \leq [\tau] \quad (2.5)$$

donde: $\tau_{m\acute{a}x}$ es la tensión actuante en el árbol en kgf/cm^2 .

$[\tau]$ es la tensión admisible del material en kgf/cm^2 .

2.6. Cálculo de la resistencia Mecánica del tramo B-159

Resistencia del tramo de la Empresa "RRL" teniendo en cuenta las características del material homogenizado. Se aplican las mismas ecuaciones pero se altera la fórmula del

módulo de resistencia a la torsión por la configuración geométrica de la pieza. (Stiopin, 1985).

2.6.1. Obtención del módulo de resistencia a la torsión para un cilindro hueco

Para el análisis del cálculo del módulo de resistencia a la torsión para este tramo se realiza, teniendo en cuenta la forma geométrica del mismo; considerando dicha forma se debe de realizar una sumatoria de las áreas de la sección transversal para poder obtener un módulo de resistencia total.

$$wt1 := 0.2 \cdot D1^3 \left(1 - \frac{d1^4}{D1^4} \right) \quad \text{cm}^3 \quad (2.6)$$

$$wt2 := 0.2 \cdot D2^3 \left(1 - \frac{d2^4}{D2^4} \right) \quad \text{cm}^3 \quad (2.7)$$

$$wt := wt1 + wt2 \quad \text{cm}^3 \quad (2.8)$$

donde: D es el diámetro exterior de la pieza.

d es el diámetro interior de la pieza.

2.6.2. Tensión máxima al cizallamiento

Para conocer el valor de la tensión máxima al cizallamiento se debe de conocer que la misma depende del momento torsor actuante y del modulo de resistencia a la torsión. Dicha ecuación que expuesta por P, A. Stiopin (1985) de la siguiente forma:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{M_{tor}}{\omega_t} \quad \text{kgf/cm}^2 \quad (2.9)$$

donde: ω_t es módulo de resistencia a la torsión en cm^3 .

Mtor es el momento torsor calculado en Ncm.

2.6.3. Condición de resistencia

Según P. A Stiopin (1985), expresa que para el análisis de una pieza sometida a torsión se debe de cumplir la siguiente condición de resistencia, teniendo en cuenta que la

misma depende de las tensiones admisible del material y de las tensiones máximas actuante durante el proceso. Dicha condición queda expresada de la siguiente forma:

$$\tau_{m\acute{a}x} \leq [\tau] \quad (2.10)$$

donde: $\tau_{m\acute{a}x}$ es la tensión actuante en el árbol en kgf/cm².

$[\tau]$ es la tensión admisible del material en kgf/cm².

2.7. Cálculo del coeficiente de seguridad para los tramos analizados

A través del cálculo para determinar el coeficiente de seguridad se puede comprobar la confiabilidad de la pieza para los esfuerzos sometidos en dicha instalación (Stiopin, 1985).

2.7.1. Factores que influyen sobre el límite de resistencia a la fatiga

Para analizar el fenómeno de resistencia a la fatiga se deben de conocer primero aquellos factores que tienen mayor influencia sobre el límite de resistencia a la fatiga, para así conocer a que condiciones están sometidas dichas piezas de estudio.

1. Concentración de tensiones.
2. Dimensiones de la pieza.
3. Estado de la superficie.
4. El carácter del tratamiento tecnológico entre otros.

Utilizando la ecuación (2.1) se obtiene el valor del momento torsor M_t tomando este el mismo valor para las dos tecnologías.

A través de la ecuación (2.2) se obtuvo el módulo de resistencia a la torsión W_t para las empresas "ECG" y la "RRL". Teniendo gran influencia en este la forma geométrica de los tramos de árbol central.

2.7.2. Cálculo del coeficiente efectivo de concentración para la torsión

Este coeficiente nos facilita la ubicación de los lugares donde se encuentran los puntos mayores concentradores que pueden facilitar la torsión. El mismo depende del coeficiente efectivo de corrección y del coeficiente de corrección. Por lo que la ecuación queda expresada de la siguiente forma:

$$K\tau = 1 + \xi \cdot [(K\tau) - 1] \quad (2.11)$$

donde: $(K\tau)$ es el coeficiente efectivo de corrección.

$\xi = 0.80$ es el coeficiente de corrección. Se busca en la (figura 12.11, Stiopin, 1985) teniendo en cuenta D/d y la curva 2 que es la utilizada para torsión.

$(K\tau) = 2$ es el coeficiente efectivo de corrección para la "ECG", según la forma geométrica del árbol (tabla 2.3, Anexo #8). Teniendo en cuenta la relación a/D y d/D . (Shigley, Mischke, 1997).

$\frac{a}{D}$ para el cilindro exterior

$\frac{d}{D}$ para el cilindro exterior

Con estos parámetros se obtiene el valor de $(K\tau)$ antes mencionados.

$(K\tau) = 4$ es el coeficiente efectivo de corrección para la "RRL", según la forma geométrica del árbol. Teniendo en cuenta la relación a/D y d/D . Para obtener el valor de este coeficiente se efectuó una sumatoria del área de la sección transversal entre ambos cilindros.

$\frac{a}{D}$ para el cilindro exterior.

$\frac{d}{D}$ para el cilindro exterior.

$\frac{a}{D}$ para el cilindro interior

$\frac{d}{D}$ para el cilindro interior

Con estos parámetros se obtiene el valor de $(K\tau)$ antes mencionados.

donde: a es el diámetro de los agujeros.

d es el diámetro interior de la pieza.

D es el diámetro exterior de la pieza.

Factor de concentración de esfuerzo $K\tau$, aproximados para barra o tubo circular con agujero transversal sometidos a torsión. (Shigley, Mischke, 1997). El esfuerzo máximo

ocurre en la superficie de los cilindros teniendo esté mayor gran influencia sobre el nombre.

2.7.3. Influencia de la Calidad de la superficie

Los ensayos demuestran que si existe un acabado superficial malo esto trae consigo una reducción en el límite de resistencia a la fatiga.

$\beta = 0.70$ Se obtiene por la fig. 12.13 Pág. 335 (Stiopin, 1985); según el acabado superficial de la pieza. Es el mismo para ambas empresas.

El tipo de acabado de la superficie es en:

- Presencia de escorias.

2.7.4. Determinación del coeficiente de seguridad para el ciclo asimétrico

El coeficiente de seguridad a la torsión en un ciclo asimétrico se determina teniendo en cuenta todos aquellos parámetros que se muestran a continuación donde la ecuación queda establecida por P, A. Stiopin (1985) de la siguiente forma:

$$n_{\tau} = \frac{[\tau]}{\frac{K_{\tau} \cdot \tau_a}{E_a \cdot \beta} + \psi_{\tau} \cdot \tau_m} \quad (2.12)$$

La ecuación que se muestra a continuación es para el conocimiento de la tensión de fluencia del material homogenizado, a través de la tensión admisible del material y de un coeficiente de seguridad asumido para el mismo.

$$[\tau] = \frac{\tau_y}{n_1} \quad (2.13)$$

Quedando definida así la ecuación de la tensión de fluencia a la torsión

$$\tau_y = 0.6 \cdot \sigma_y \quad (2.14)$$

$\sigma_y = 3790 \text{ kgf} / \text{cm}^2$ para un material sometido a tracción compresión

Tensión media sometida en los tramos cuando existe una sobre carga de mineral en el horno

$$\tau_a = \frac{\tau_{\text{máx}} - \tau_{\text{mín}}}{2} \quad (2.15)$$

Por lo que la ecuación 2.15 queda:

$$\tau_a = \frac{\tau_{m\acute{a}x}}{2} \quad (2.16)$$

donde:

τ_a es la tensión media del ciclo. Ver (tabla 3.1 y 3.2)

$\tau_{m\acute{a}x}$ es la tensión tangencial máxima.

$\tau_{m\acute{i}n} = 0$ es la tensión tangencial mínima.

$[\tau]$ es la tensión admisible del material. Ver (tabla 3.1 y 3.2)

$E_a = 0.71$ es el coeficiente de escala a la torsión. Según (Stiopin, 1985).

$\psi\tau$ es el coeficiente que caracteriza la sensibilidad del material. Para el **Hierro fundido** según (Stiopin, 1985) es $\psi\tau = 0$

β es la calidad de la superficie ante mencionada.

$K\tau$ es el coeficiente efectivo de concentración para la torsión.

τ_m es la tensión media al cizallamiento.

2.7.5. Condición para el coeficiente de seguridad

P, A. Stiopin plantea que se debe de cumplir dicha condición de resistencia para la confiabilidad de fabricación de la pieza, la misma queda expresada de la siguiente forma:

$$n_\tau \geq [n_{normativo}] \quad (2.17)$$

Esta condición se cumple para ambos casos de la fabricación de los tramos. Queriendo decir que para el material homogenizado; ambas piezas son confiables ya que las tensiones que actúan en las mismas son tan pequeñas que no influyen en la destrucción del árbol.

Nota: Para llegar a conclusión el coeficiente de seguridad normativo es $[n_{normativo}] = 2.53$ si el coeficiente de seguridad calculado es menor que el normativo (**se debe de cambiar el material o aumentar el diámetro de la pieza**).

2.8. Cálculo para conocer la confiabilidad de la pieza

Realizando este cálculo se puede conocer la confiabilidad de la pieza bajo los esfuerzos a los cuales están sometidos los mismos durante su funcionamiento. Poniéndose en vigencia el alto grado de seguridad de las mismas.

Para el tramo de la "ECG"

$$\% = \left[1 - \frac{\tau_{\min}}{(\tau_{\max})} \right] \cdot 100\%$$

$$\% = \left[1 - \frac{0.2474}{50} \right] \cdot 100\%$$

$$\% = [1 - 0.0049] \cdot 100\%$$

$$\% = 0.9951 \cdot 100\%$$

$$\% = 99.5$$

Para el tramo de la "RRL"

$$\% = \left[1 - \frac{\tau_{\min}}{(\tau_{\max})} \right] \cdot 100\%$$

$$\% = \left[1 - \frac{0.22}{50} \right] \cdot 100\%$$

$$\% = [1 - 0.0044] \cdot 100\%$$

$$\% = 0.9956 \cdot 100\%$$

$$\% = 99.56$$

(2.18)

2.9. Modelación por el método de elemento finito

Zienkiewicz, Cheung (1967), expresaron que para realizar la modelación por el método de elemento hay que tener en cuenta todos aquellos parámetros que tienen influencia sobre la pieza analizada; donde estos influyen en todas las características de los mismos.

Durante el análisis por el método de elemento finito se tuvieron en cuenta los siguientes pasos para el modelado:

1. Obtención del modelo geométrico
2. Aplicación de las condiciones de fronteras y de cargas
3. Mallado
4. Búsqueda de la solución(solver)
5. Realización del post procesamiento y obtención de las respuestas en el dominio de las tensiones, los esfuerzos y los desplazamientos.

En el MEF es necesario definir los esfuerzos y los desplazamientos; para los esfuerzos (Zienkiewicz, 2000) el sistema fijo de coordenadas cartesianas se denota como x,y,z o en forma indexada x1, x2, x3, de la misma manera los desplazamientos pueden ser

denotados como u, v, w o u_1, u_2, u_3 . Por ello es posible definir x_i como las coordenadas y (u_i) como los desplazamientos, siendo los rangos de 1, 2, 3. Para aplicaciones tridimensionales se puede definir el sistema de coordenadas de la manera siguiente:

$$X = \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ y_2 \\ z_3 \end{Bmatrix} \quad (2.19)$$

y los desplazamientos como:

$$u = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} \quad (2.20)$$

Las tensiones del objeto se expresan:

$$\sigma = [\sigma_{11} \cdot \sigma_{22} \cdot \sigma_{33} \cdot \sigma_{12} \cdot \sigma_{23} \cdot \sigma_{31}] = [\sigma_{xx} \cdot \sigma_{yy} \cdot \sigma_{zz} \cdot \sigma_{yx} \cdot \sigma_{yz} \cdot \sigma_{zx}]^t \quad (2.21)$$

y los esfuerzos:

$$\xi = [\xi_{11} \cdot \xi_{22} \cdot \xi_{33} \cdot \gamma_{12} \cdot \gamma_{23} \cdot \gamma_{31}] = [\xi_{xx} \cdot \xi_{yy} \cdot \xi_{zz} \cdot \gamma_{yx} \cdot \gamma_{yz} \cdot \gamma_{zx}]^t \quad (2.22)$$

Siendo: γ_{ij} - tensor de simetría, asumido teniendo en cuenta criterios de ingeniería con el valor de $2\xi_{ij}$.

La aproximación de los desplazamientos de los elementos finitos y los desplazamientos virtuales se denotan en forma isoparamétrica por:

$$u(\xi, i) = N(\xi)\ddot{u}(t) ; \xi u(\zeta)\delta\ddot{u} \quad \text{con } x(\zeta)x \quad (2.23)$$

Para computarizar los esfuerzos virtuales se empleó: $\delta e = S\delta u = (SN)e\ddot{u} = B\delta\ddot{u}$ en los que la matriz de esfuerzo-desplazamiento se calcula como:

$$B = \begin{bmatrix} 0 & N_2 & 0 \\ 0 & 0 & N_3 \\ N_2 & N_1 & 0 \\ 0 & N_3 & N_2 \\ N_3 & 0 & N_1 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Siendo arbitrario el parámetro virtual δu , para el problema discreto se obtiene $M\ddot{u} + P_s = f$, donde:

$$M = \int_{\Omega} N^t \rho N d\Omega \quad (2.25)$$

$$M = \int_{\Omega} N^t b d\Omega + \int_{\Gamma} N^t t d\Gamma \quad (2.26)$$

El término P es comúnmente referido a la divergencia de las tensiones o de las fuerzas actuantes:

$$P(\sigma) = \int_{\Omega} B^t \sigma d\Omega \quad (2.27)$$

El modelo discretizado (mayado) se obtuvo para realizar la simulación, conociendo las características geométricas, las solicitaciones y las condiciones de borde, además de tener en cuenta que el tubo trabaja bajo grandes cargas y temperaturas muy severas, superiores a 650 °C.

2.9.1. Mallado del modelo

La resolución de cualquier problema, ya sea mecánico o de cualquier otro tipo, mediante el método de los elementos finitos requiere definir previamente el mallado de elementos (i.e. discretizar el problema). El modelado mediante elementos finitos (FEM) involucra, además, la elección del tipo de elementos (o las funciones de forma), del modelo constitutivo correspondiente a cada elemento y del tipo de algoritmo numérico (solver) que se utilizará para resolver el sistema de ecuaciones.

Para cada nodo j se define una función, N_j con valores no nulos en la región V_j formada por los elementos que comparten dicho nodo. La función N_j se elige de forma que sea igual a la unidad en el nodo j y nula en el resto de nodos de la región V_j . En cada elemento V e solo toman valores no nulos las funciones N_j correspondientes a cada uno de sus nodos. Este hecho permite automatizar y simplificar notablemente la resolución del sistema de ecuaciones mediante métodos numéricos tradicionales.

2.9.1.1. Los elementos en el mallado

Un elemento es algo más que una determinada región en una malla. Cuando se programa un elemento hay que definir la expresión analítica de las funciones de forma de sus nodos. El bloqueo de elementos es un fenómeno numérico que acontece cuando el número de ligaduras iguala al número de grados de libertad del elemento. Cuando esto sucede, el

elemento no puede sufrir ningún tipo de deformación, o se vuelve irrealmente rígido. Los elementos no lineales son más susceptibles de sufrir bloqueo, porque al aumentar el número de nodos aumenta el número de ligaduras.

2.9.2. Condiciones de fronteras

Tan importantes como las ecuaciones de gobierno son las condiciones de contorno y las condiciones iniciales. Las mismas tienen gran importancia para las discusiones sobre las posibles condiciones de contorno e iniciales.

Las condiciones iniciales definen el estado del sólido en el instante inicial considerado para la evolución temporal. Por tanto, para el análisis de la definición de un problema se deberá conocer el valor que tienen todas las variables en ese instante. Muchas veces, en problemas resueltos mediante técnicas numéricas esto es imposible, con lo que se ha de buscar una alternativa. La más sencilla y habitual consiste en dar a todas las variables un valor cero, asumiendo que, si se avanza suficientemente en el tiempo, se llega a un estado estacionario, o periódico, independientemente de la solución inicial, según las condiciones de contorno sean constantes o periódicas. Tiene como ventaja la sencillez de implementación, pero tiene una gran desventaja, pues si dicha solución inicial se aparta bastante de la solución real, puede dar lugar a problemas de convergencia en cuanto a la resolución de las ecuaciones.

En función del tipo de evolución temporal, se clasifican las ecuaciones diferenciales y, por tanto los problemas de origen, en elípticas, parabólicas e hiperbólicas. Una ecuación diferencial se clasifica dentro de un grupo u otro dependiendo de la forma de dependencia espacio-temporal de la evolución de las variables.

Las condiciones de contorno pueden ser de varios tipos. Los más comunes en la práctica son:

- Condiciones de contorno tipo Dirichlet: La variable dependiente es conocida en la frontera física del problema.
- Condiciones de contorno tipo Neumann: Se conoce en la frontera física del problema el valor del gradiente normal de la variable dependiente.
- Condiciones de contorno tipo Robin: La condición conocida constituye una combinación lineal de los tipos anteriores.

- Condiciones de contorno mixtas. En unas zonas de la frontera física se tienen condiciones de contorno Dirichlet y en otras zonas condiciones del tipo Neumann.

La correcta definición de las condiciones de contorno constituye una parte fundamental en la definición de un problema numérico.

2.9.3. Resolución del sistema de ecuaciones

El análisis de cualquier problema mediante el Método de Elementos Finitos requiere resolver un sistema de ecuaciones análogo al expresado en forma matricial. Este sistema tiene un número finito de incógnitas, tantas como desplazamientos nodales posibles.

Algunas de las incógnitas se determinan directamente al aplicar las condiciones de contorno a los nodos de la superficie, y el resto se obtiene resolviendo el sistema de ecuaciones mediante métodos de cálculo computerizado.

El procedimiento de resolución del sistema de ecuaciones, comúnmente denominado *solver*, es el corazón de cualquier programa de simulación por el Método de Elementos Finitos. Los métodos de resolución numérica de sistemas de ecuaciones se clasifican en dos grandes grupos: Métodos matriciales o directos y métodos vectoriales o indirectos.

Los métodos matriciales construyen la matriz de rigidez global del sistema, de ahí su nombre, y la invierten. Estos métodos son los más tradicionales y extendidos, entre otras razones porque desde el punto de vista. Es decir, el número de incógnitas es igual al número de grados de libertad de cada nodo por el número de nodos.

2.9.4. Algoritmos de evaluación de integrales

Uno de los objetivos en el desarrollo del método de elementos finitos es reducir el número de elementos necesarios para realizar un cálculo preciso, al objeto de disminuir el tiempo de cálculo y las necesidades de almacenamiento en memoria.

Esto es especialmente importante en problemas tridimensionales donde, incluso en modelos relativamente sencillos, el número de elementos se dispara rápidamente si se desea cierta precisión. Afortunadamente existen situaciones en las que se puede reducir un problema tridimensional a uno en dos dimensiones, gracias a las simetrías existentes. Este es el caso de problemas que presentan simetría de revolución (ej. un contacto hertziano), ya que el estado tensional es el mismo en cualquier plano perteneciente al eje

de simetría. Por ello estos métodos de integración se denominan en ocasiones cuadraturas de Gauss-Legendre.

2.9.5. Modelos constitutivos

Todo elemento representa una porción de sistema con unas determinadas propiedades físicas. Por ejemplo, en un problema mecánico las propiedades físicas determinan la relación entre tensiones y deformaciones en el medio. Las expresiones que relacionan causa y efecto a través de propiedades físicas del medio se denominan ecuaciones o modelos constitutivos (también modelos de material). El gran potencial del análisis mediante elementos finitos reside precisamente en que no está restringido al estudio de problemas elásticos lineales, sino que es capaz de abordar cualquier tipo de no linealidad, ya sea geométrica o debida al comportamiento del material. La no linealidad en las ecuaciones constitutivas puede expresarse, en general, como una dependencia del tensor C respecto de algún parámetro mecánico: σ , δ , $\dot{\gamma}$, entre otros. Para calcular cualquiera de estas variables mecánicas es necesario conocer previamente C que a su vez depende de estas variables.

En el Método de los Elementos Finitos la definición de las funciones de forma es independiente de la geometría del problema y de las condiciones de contorno. Por este motivo, este método constituye una potente herramienta de cálculo muy versátil para la resolución de numerosos problemas de interés práctico, funciones de forma locales que se anulan en todo punto, salvo en una región determinada del sólido. Cada función de forma queda definida por una expresión analítica (generalmente polinómica) y por la región donde toma valores no nulos.

Al objeto de utilizar estas funciones de forma, se divide el dominio V en una serie de regiones V_e , que se denominan elementos finitos, o simplemente elementos, y que dan nombre al método. En la frontera de cada elemento se sitúan una serie de puntos denominados nodos o nudos. La rejilla de nodos y elementos resultante de esta división se conoce como mayado, o simplemente malla. La elección del mayado y de la geometría de los elementos depende de muchos factores: geometría del problema, minimización de errores, parámetros que se desean conocer, etc.

2.10. Conclusiones del Capítulo II

1. Las ecuaciones desarrolladas caracterizan el comportamiento de la resistencia mecánica de los árboles centrales de los hornos de reducción del mineral.
2. A través de las ecuaciones empleadas para el cálculo de la resistencia mecánica se pueden determinar las tensiones y el momento torsor actuante en dicho proceso.
3. Los métodos de investigación utilizados se complementan con el empleo de una actualizada base experimental, tecnologías, software y equipamiento novedosos que garantizan precisión y confiabilidad a los resultados.

CAPITULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Introducción

En este capítulo se establece el conjunto de criterios y postulados que sustentan las teorías que corroboran la veracidad de la hipótesis científica y estadísticas planteadas, como resultado del análisis y el procesamiento de la información obtenida a través de la observación o realización de los experimentos, simulaciones y ensayos.

En los últimos años el impacto del medio ambiente ha sentido la necesidad imperiosa de preservar la naturaleza, por motivo a los daños que estamos sufriendo en la actualidad debido al maltrato del Medio Ambiente.

Objetivo: Examinar los resultados del cálculo de la resistencia mecánica, la interpretación de la simulación por el MEF, desarrollar la valoración económica relacionada con el proceso de fabricación y el análisis de las afectaciones que tiene la planta durante el proceso sobre el medio ambiente.

3.2. Características del material homogenizado

Los estudios que se le realizaron a las muestras permitieron obtener como resultado la composición química y las propiedades mecánicas del material homogenizado. Dicho estudios facilitaron el comportamiento de la resistencia mecánica bajo los efectos de la temperatura a las cuales están expuestas las aleaciones. Los resultados del estudio se pueden ver en el (anexo #7).

3.3. Resultado de los cálculos de la resistencia mecánica

La metodología seguida para conocer la resistencia mecánica del material homogenizado se pudo lograr a través de los métodos antes planteados. Teniendo en cuenta que la metodología fue utilizada para las mismas condiciones de trabajo y para iguales condiciones atmosférica, teniendo gran influencia sobre este la forma geométrica de ambos tramos analizados.

Además del cálculo de resistencia, se efectuó el cálculo del coeficiente de seguridad influyendo en este la forma geométrica de la pieza. Ya que en éste se analizan los concentradores de tensiones que intervienen en el funcionamiento de dichos tramos.

Los cálculos del coeficiente me brindaron gran información ya que se puede apreciar el alto grado de confiabilidad del material homogenizado para dichos tramos.

3.3.1. Resultados de las tensiones máximas actuantes en dichos tramos

Para determinar la tensión máxima que actuará sobre la zona de contacto, para dicha determinación se empleará la ecuación (2.4), sabiendo que la misma depende del momento torsor actuante y del módulo de resistencia a la torsión parámetros ya calculados por la ecuación (2.1) y (2.3).

Durante el cálculo del momento torsor efectuado por la ecuación (2.1) hay que tener en cuenta que este depende de la potencia la cual tiene un valor de $N = 20kw$ y de la frecuencia de rotación con la cual se desplaza dicho árbol que tiene un valor de $w = 0.1517rad / s$

Para la obtención del módulo de resistencia a la torsión para la tecnología de la empresa "ECG" se realiza a través de la ecuación (2.3) y para la tecnología de la "RRL" se tuvieron en cuenta la ecuación (2.6 – 2.8) para un posterior análisis de los resultados hay que conocer la dimensión del diámetro exterior e interior de los árboles; donde los mismos se expresan a continuación:

Tabla 3.1. Dimensiones consultadas para lograr el análisis de los resultados

Empresas	Dimensiones en (mm)	
	D	d
ECG	980	900
RRL	978 (cilindro exterior)	914 (cilindro exterior)
	680 (cilindro interior)	630 (cilindro interior)

Después de haber realizado el análisis de cada parámetro por los cuales se rige la ecuación (2.4), se pudieron obtener los resultados de dichas tensiones para ambas empresas, las mismas toman los valores siguientes:

1. Las tensiones aplicadas en el tramo de la empresa "Ernesto Ché Guevara" toma el valor siguiente: $\tau_{Máx_{ECG}} = 2.474N / mm^2$
2. Las tensiones sometidas a los tramos de la empresa "Rene Ramos Latour" toma el valor siguiente: $\tau_{Máx_{RRL}} = 2.2N / mm^2$

Estos resultados me permiten conocer las tensiones que actúan durante el funcionamiento de los tramos de árboles centrales de los hornos de reducción de mineral. Conocido los valores de dichas tensiones se puede efectuar la comprobación de la resistencia mecánica de dicho material homogenizado para la fabricación de los tramos en el proceso Caron.

3.3.2. Resultado de la resistencia mecánica para ambas tecnologías

Para dicho análisis hay que tener en cuenta los valores de las tensiones antes expuestas; teniendo influencia en estos la forma geométrica de los tramos estudiados. Partiendo del criterio de P, A. Stiopin (1985) quedaría la condición de resistencia siguiente:

3.3.2.1. Condición de resistencia para el tramo de la "ECG"

$$\tau_{m\acute{a}x} \leq [\tau]$$

$$0.24kgf / mm^2 \leq 50kgf / mm^2$$

Con la realización de los cálculos correspondientes y los resultados obtenidos para este tramo, podemos llegar a la conclusión que el material resiste las condiciones de resistencia con un 99.5% de seguridad para su funcionamiento. El cálculo de seguridad se analizo a partir la ecuación (2.18).

3.3.2.2. Condición de resistencia para el tramo de la "RRL"

$$\tau_{m\acute{a}x} \leq [\tau]$$

$$0.22kgf / mm^2 \leq 50kgf / mm^2$$

Mediante el desarrollo de los cálculos adecuados y los resultados alcanzados para este tramo, podemos llegar a la conclusión que el material resiste las condiciones de resistencia con un 99.56 % de seguridad para su funcionamiento. El cálculo de seguridad se analizo a partir la ecuación (2.18).

Haciendo este análisis de resistencia se demuestra que ambos tramos resisten las tensiones a las cuales están sometidos durante su funcionamiento con un alto porcentaje de seguridad. Por lo que queda demostrada una vez más que el material homogenizado puede sustituir al material presente en ambas tecnologías.

3.3.3. Determinación del coeficiente de seguridad para los tramos analizados

Para la determinación del coeficiente de seguridad hay que tener presente que los tramos son asimétricos y la influencia de sus formas geométricas, las cuales tienen gran influencia durante el cálculo del coeficiente de seguridad.

Para realizar el cálculo del coeficiente de seguridad hay que partir de la ecuación propuesta por P. A. Stiopin (1985) para piezas asimétricas se emplea la ecuación (2.12).

La misma depende de la tensión admisible que se obtienen por la ecuación (2.13) $[\tau] = 75.8 N/mm^2$ asumiendo un coeficiente de seguridad de $n=3$ y (2.14) para el cálculo de la tensión de fluencia donde las mismas toman un valor de $\tau_y = 227.4 N/mm^2$.

Tiene influencia también la tensión media sometida en los tramos esta se calcula por la ecuación (2.16) tomando un valor de $\tau_a = 1.237 N/mm^2$ para la "ECG" y para la "RRL" toma un valor $\tau_a = 1.1 N/mm^2$; dependiendo estos de las tensiones máximas actuantes antes mencionadas.

Para el cálculo del coeficiente de seguridad siguen teniendo influencia otros coeficientes los mismos son:

- El coeficiente de escala a la torsión según Stiopin (1985) toma igual al de la torsión teniendo la misma un valor de $E_a = 0.71$.
- Coeficiente que caracteriza la sensibilidad del material. Según Stiopin (1985) para los hierros fundidos $\psi_\tau = 0$
- Tiene gran influencia el acabado superficial de la misma se obtiene por la figura 12.13 Pág.135 Stiopin tomando un valor $\beta = 0.70$. Para ambos tramos se consideró que el acabado superficial era con presencia de escorias.
- Coeficiente efectivo de concentración para la torsión el cual se puede determinar por la ecuación (2.11). Tendiendo gran influencia sobre este el coeficiente de corrección $\xi = 0.80$ se obtiene en la (figura 12.11) del Stiopin, otro que influye es el coeficiente efectivo de corrección el cual se obtiene en el anexo #8 (tabla 2.3)

el mismo toma un valor de $(K_{\tau})= 2$ para la "ECG" y $(K_{\tau})= 4$ para "RRL", teniendo gran influencia en esto sus formas geométricas.

Cuando se realiza el análisis con todos los parámetros se puede obtener los coeficientes de seguridad que nos brinda cada tecnología a fabricar para el nuevo material propuesto, los mismos toman los valores siguientes: para la "ECG" $n=15$ y para la "RRL" $n= 8.6$.

3.3.3.1. Condición a cumplir para el coeficiente de seguridad

La condición que se debe de cumplir según Stiopin (1985) para la confiabilidad de la fabricación de la pieza es:

Para la "ECG"

$$n_{\tau} \geq [n_{\text{normativo}}]$$

$$15 \geq 2.53$$

Para la "RRL"

$$n_{\tau} \geq [n_{\text{normativo}}]$$

$$8.6 \geq 2.53$$

El conocimiento de todos los parámetros que componen la ecuación (2.12) me posibilitan efectuar el cálculo de dicho coeficiente de seguridad. Dicho coeficiente de seguridad para el material homogenizado es confiable ya que demuestra que las tensiones actuantes son lo bastante pequeña comparado con la admisible en el material. Dicho coeficiente de seguridad para la Empresa "ECG" tiene un valor de $n_{\tau}=15$ y para la empresa "RRL" es de $n_{\tau}= 8.6$. Esto demuestra una vez más que el material propuesto cumple su objetivo en todos los parámetros analizados.

3.4. Modelación y Simulación por el Método de Elementos Finitos

Se realizó la modelación utilizando el paquete de software ANSYS V.10 como proceso del Método de Elementos Finitos, las corridas de los experimentos fueron hechas aplicando las cargas en una esquina del cilindro como uno de los lugares donde existe mayor tendencia a la deformación plástica.

Las tensiones máximas ocurrieron en la superficie donde se encuentran ubicados los nervios concentradores de tensión. Como puede verse en la figura # 3.1, la grieta que provoca la rotura comienza por la parte exterior de los nervios y en aquellos lugares donde la concentración de tensiones es mayor, o sea, en los cambios de sección de los

agujeros. Esto se corrobora comparando la forma de la falla de los tramos con la respuesta de tensiones representada en las figuras (3.1 - 3.6), donde se muestra que el refuerzo se fractura específicamente por la zona donde comienza la grieta que lo avería; este comportamiento fue observado en simulaciones efectuadas en estos tramos para diferentes configuraciones de la pieza y relaciones diámetro interior/diámetro exterior.

3.4.1. Resultado de la simulación del los tramos de ambas empresas

La figura 3.1 refleja las tensiones máximas y mínimas a la que se encuentra sometido el tramo, las mismas están próximas a la línea de intercepción del nervio y la parte exterior del cilindro, la misma alcanza los valores de 57.6 N/mm^2 y las mínimas tienen un valor de 0.03 N/m^2 . Las máximas tensiones están en la zona cercana a la intersección de los nervios con el cilindro exterior, por lo que esta cercanía provoca el agrietamiento de los nervios ver anexo #5 (figura 1.7).

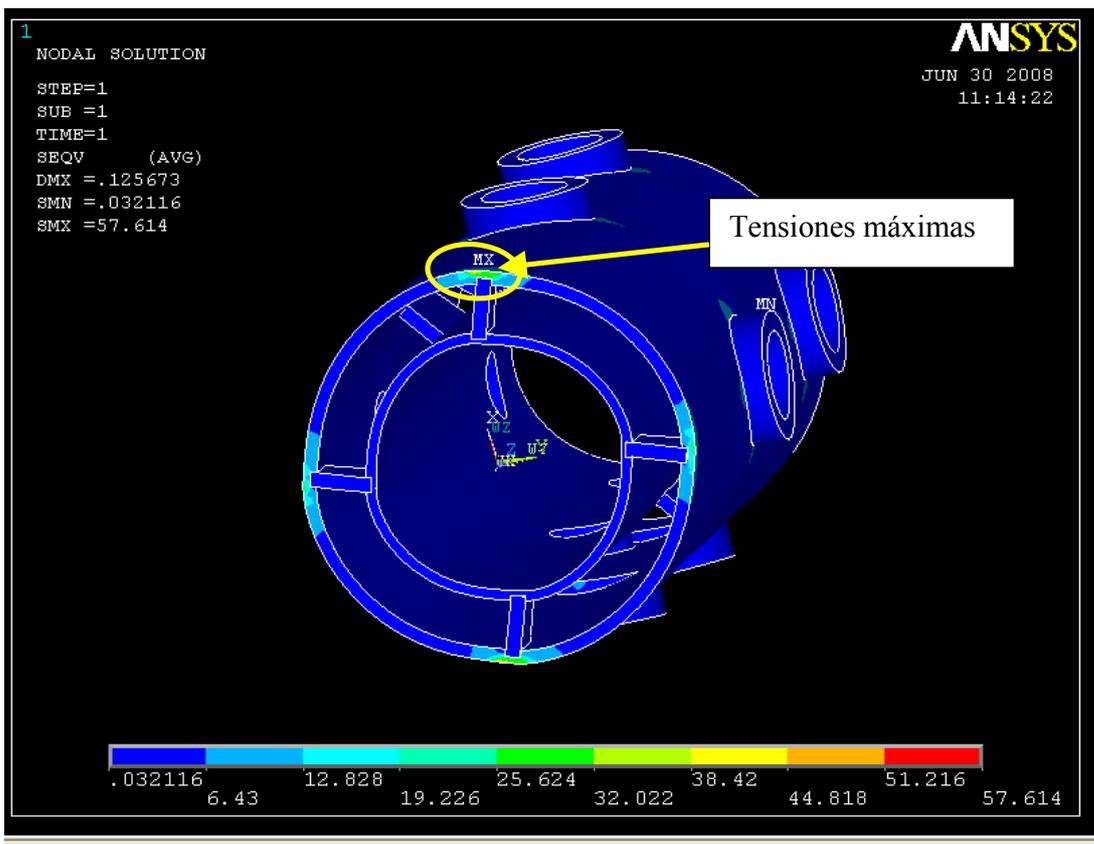


Figura 3.1. Sección donde se alcanzan los máximos valores de las tensiones

Refiriéndonos a los resultados adquiridos en la figura 3.2 se muestra como ha variado el desplazamiento con respecto a las tensiones desde el comienzo del proceso de deformación que sufre el tramo objeto de estudio para las condiciones a las cuales se analiza. Los mayores puntos de desplazamientos se encuentran en la intercepción del nervio con los cilindros tomando valores máximos de 0.12 mm.

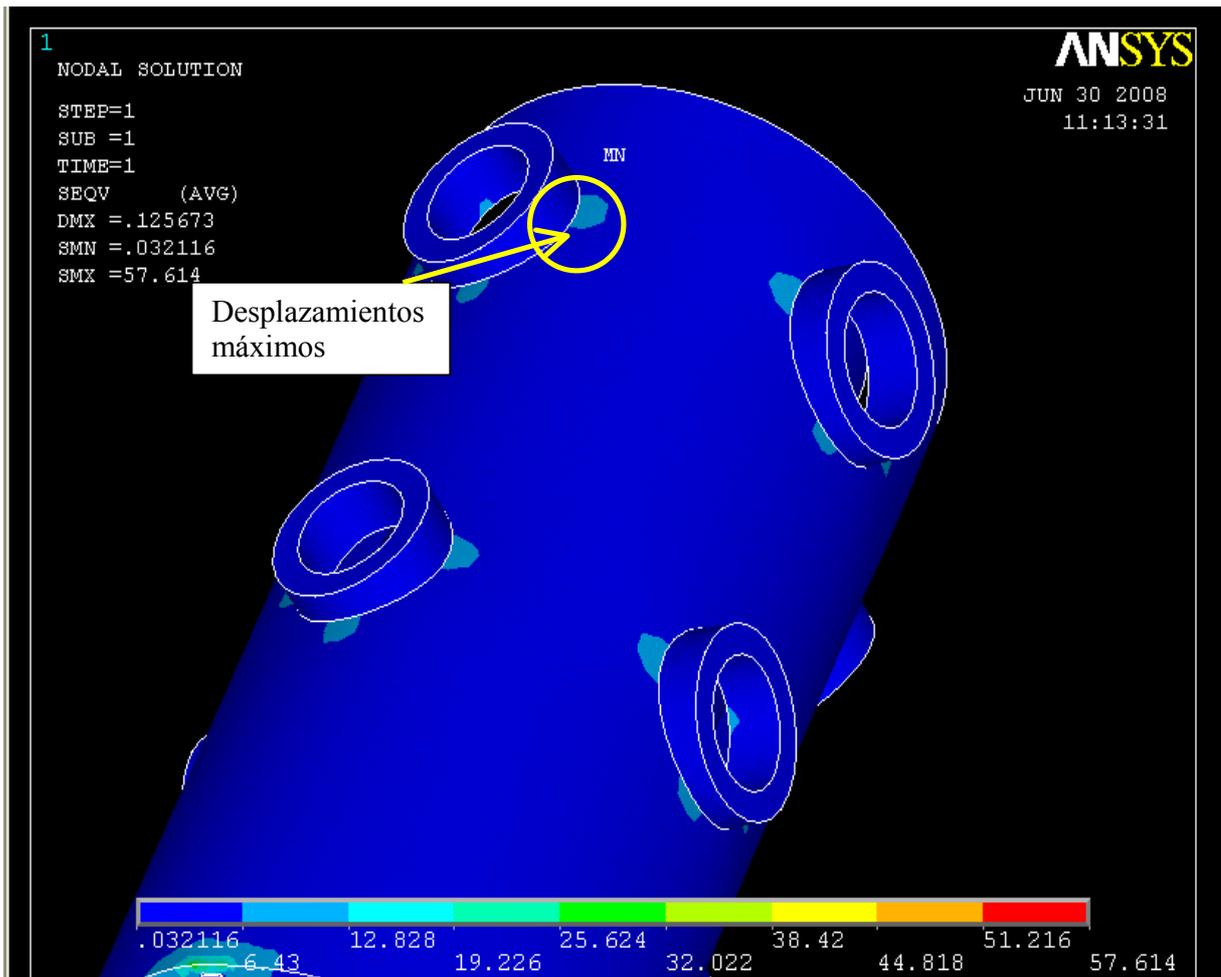


Figura 3.2. Distribución de las cargas en los nervios

La figura 3.3 refleja el comportamiento de los desplazamientos del tramo objeto de estudio bajo el efecto de las tensiones a las cuales está sometido durante su funcionamiento. En el mismo se pueden obtener los desplazamientos máximos y mínimos según la modelación por elementos finitos. Los valores de los desplazamientos se encuentran en el orden de los 0.0087 – 0.071 mm en la intercepción de los nervios con el cuerpo de los cilindros. Estos desplazamientos se tomaron de la animación.

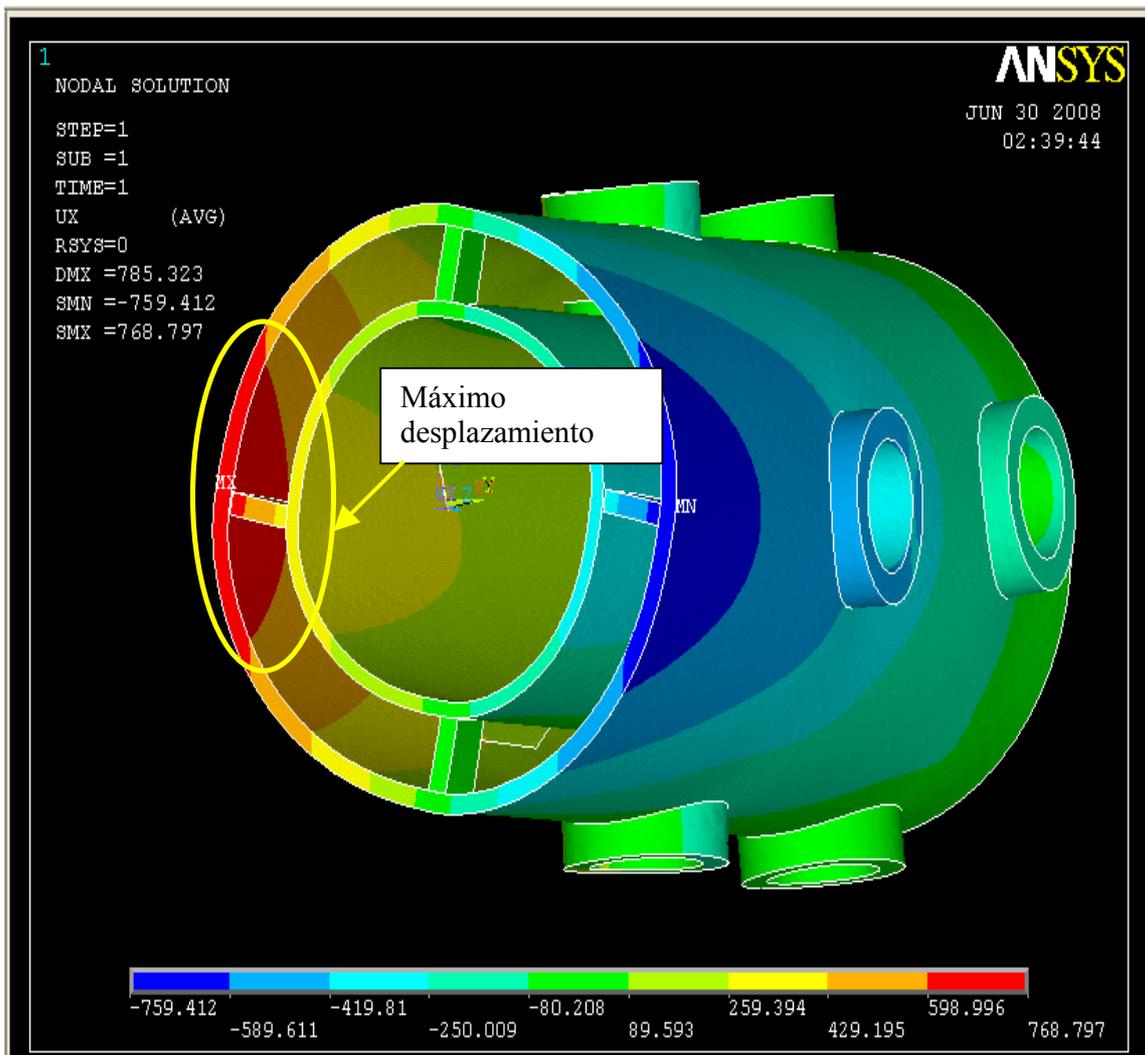


Figura 3.3. Distribución de los desplazamientos

3.4.2. Resultados de la simulación del tramo 2030 de la fabrica "ECG"

La figura (3.4) muestra el comienzo del proceso de deformación una vez aplicada las tensiones, en estas figuras se puede apreciar la parte de la pieza que tiende a deformarse primero, identificado a través de la gama de colores. Permitiendo conocer los valores máximos y mínimos de las tensiones que actúan en dicho tramo analizado, las cuales se encuentran comprendidas entre 0.007 – 56.4 N/mm²

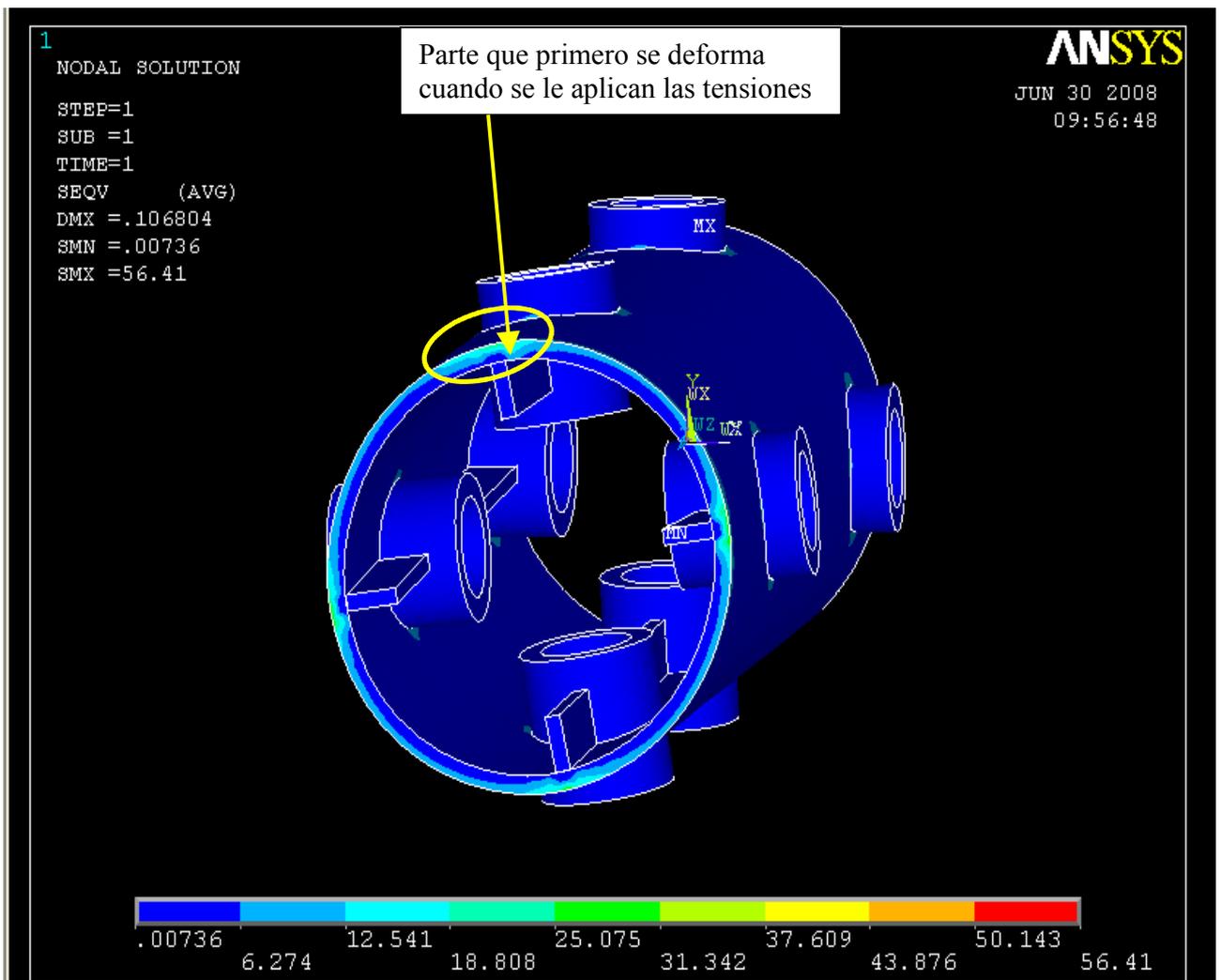


Figura 3.4. Sección donde comienza a deformarse la pieza por los valores de las tensiones

Refiriéndose a los resultados adquiridos en la figura 3.5 se muestra como ha variado el desplazamiento respecto con las tensiones desde el comienzo del proceso de deformación que sufre el tramo objeto de estudio para las condiciones a las cuales se analiza. El efecto de los desplazamientos, se puede observar en la parte inferior de los muñones tomando valores de 0.10 mm

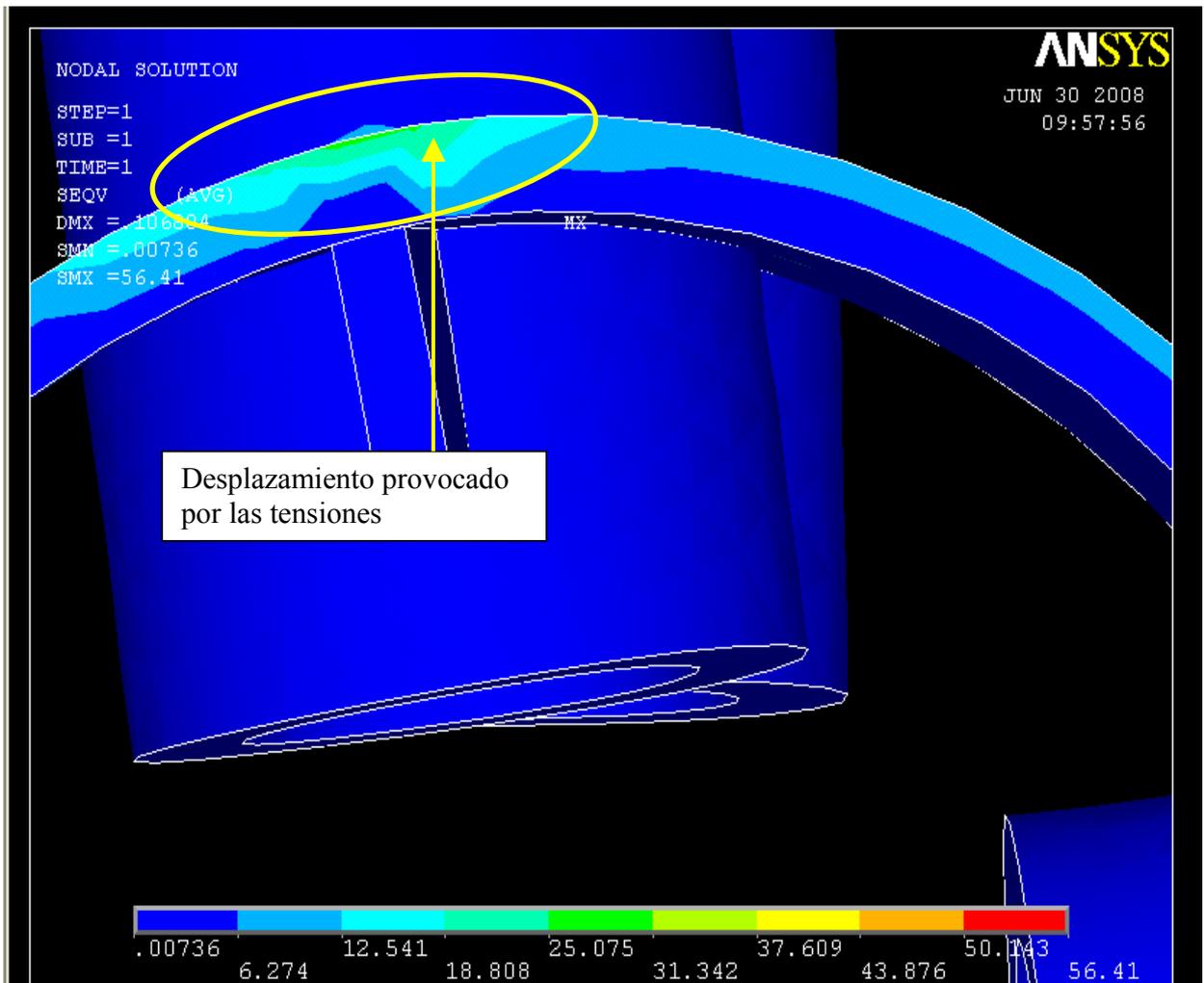


Figura 3.5. Distribución de los desplazamientos

La figura 3.6 refleja las tensiones máximas y mínimas a la que se encuentra sometido el tramo, estas tienen un valor de 56.4 N/mm^2 y las mínimas tienen un valor de 0.007 N/mm^2 . Las máximas tensiones están en la zona cercana a la línea de intercepción del nervio y la parte externa; como efecto de esta cercanía tiene gran influencia para la formación de grietas en los nervios ver anexo #5 (figura 1.6). Estas tensiones se tomaron durante la animación.

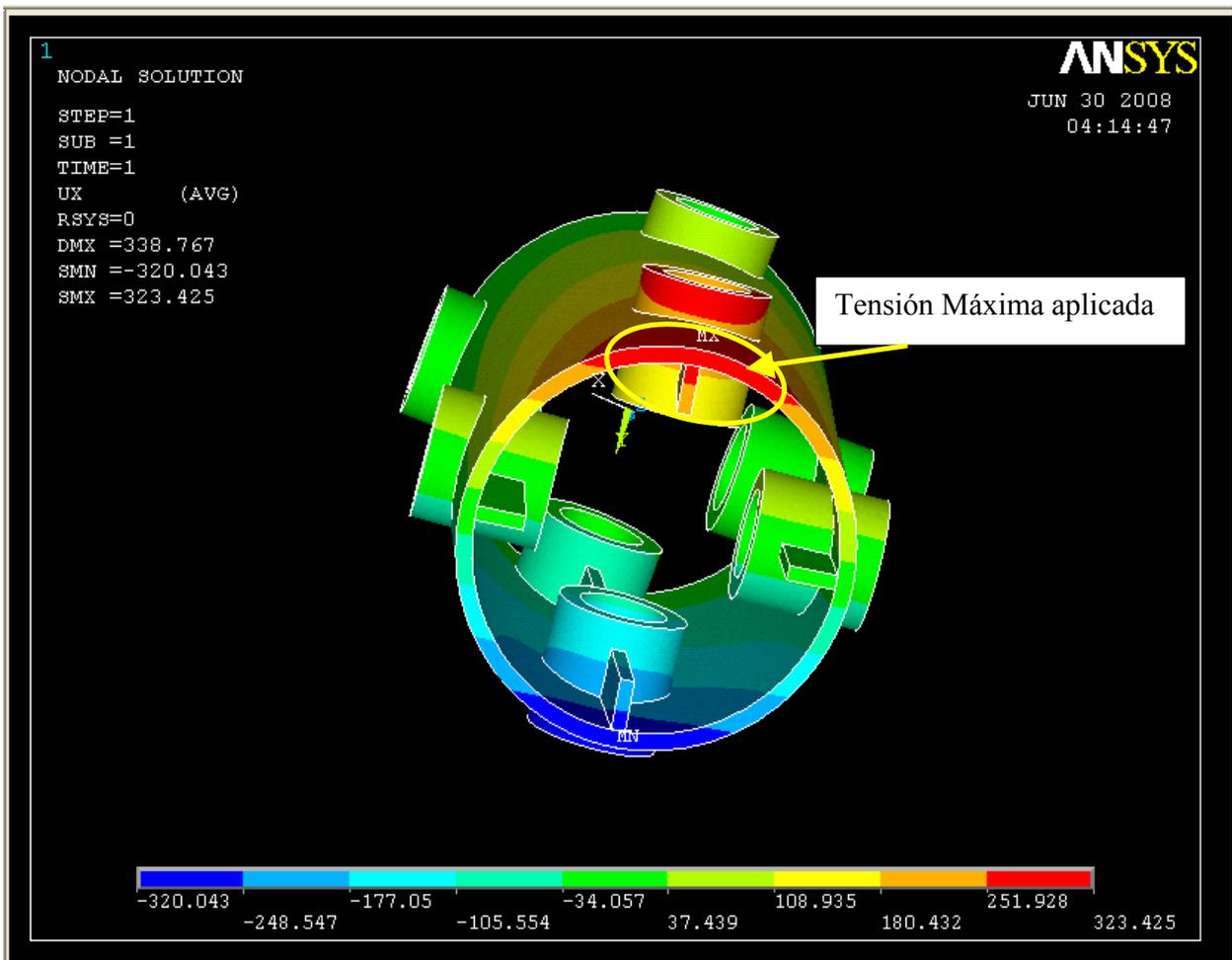


Figura 3.6. Sección donde comienza a deformarse la pieza por los valores de las tensiones

3.5. Valoración económica y Medioambiental

El análisis económico consiste en la investigación metodológica de todos los componentes de un producto existente, con el objetivo de describir y eliminar costos innecesarios sin interferir en la eficiencia del mismo.

La valoración económica se realizó para ambas empresas teniendo en cuenta los materiales existentes en la fabricación de los tramos de ambas tecnologías. Para dicha valoración económica se consideró también el material homogenizado para ambas empresas, teniendo en cuenta todos los medios que se utilizan durante la fabricación de los tramos. La misma está desarrollada para una tonelada de material; se tienen en cuenta la fuerza de trabajo. Como final se analiza el listado de los materiales con los cuales se pueden obtener dichas aleaciones.

3.5.1. Costo para el montaje del tramo

El costo para el montaje del tramo tiene en cuenta a todos los trabajadores que influyen de una forma o de otra en la realización del mismo por lo que a estos se les controla todas las operaciones que hagan durante el montaje; a través de este control es que se les paga a los obreros. Para saber el costo del montaje de un tramo ver en el anexo #9 tabla (3.2).

3.5.2. Costo del tramo

Las fábricas que poseen tecnologías Caron en Cuba compran los tramos en moneda convertible. El valor de dicho costo se puede observar en el anexo #9 tabla (3.3).

3.5.3. Materiales utilizados en el mantenimiento

Para realizar un mantenimiento, uno debe de contar con los medios, dispositivos y materiales que faciliten el mismo. Para poder obtener el costo del mantenimiento se tuvieron en cuenta todos los parámetros mencionados. Estos materiales permitieron efectuar el mantenimiento de dicho tramo con buenos resultados; ya que si estos no se realizan adecuadamente tienen gran influencia en el aumento del costo del mantenimiento. Para conocer el costo del mantenimiento de los tramos ver en el anexo # 9 tabla (3.4).

3.5.4. Costo de los elementos para las fabricaciones del material viejo

Teniendo en cuenta todos los materiales y los obreros que tienen que ver de una forma o de otra en la fabricación de la aleación para la posterior construcción de los tramos objetos de estudio, conociendo estas características se puede hacer un costo total de fabricación para la aleación. Este precio se puede observar en el anexo #9 tabla (3.5) para la fabricación de una tonelada de material.

3.5.5. Costo de los elementos para el material homogenizado (Hierro nodular)

Conociendo todos los materiales que se van a utilizar para obtener la aleación deseada, los medios que se van a utilizar para que se logre el proceso de fabricación y la fuerza de trabajo que va a desarrollar dicho proceso; entonces se podrá conocer el costo total de la producción para elaborar dicho objetivo. Este costo total se puede observar en el anexo #9 tabla (3.6).

3.5.6. Resultados de los elementos en la producción de los tramos:

A la empresa mecánica del níquel "Gustavo Machin" le cuesta en CUC \$ **3210.96** producir una tonelada de material para la fundición del hierro aleado al FeCrNiMoCu y para la fundición del hierro aleado (nodular) al FeNiMo le cuesta en CUC \$ **3098.5**.

3.5.7. Resultados de la Valoración económica: En la actividad de **montaje** de la pieza se encuentra incluida la fuerza de trabajo para realizar dicha labor, la cual asciende aún costo total de \$ **104.463**.

3.5.8. Resultados de la Valoración económica del Mantenimiento: El mantenimiento del horno de reducción de mineral #18, generó un costo general de \$**193269.25**. Donde si no se cumplen todas las orientaciones para este mantenimiento los costos por mantenimiento aumentan, por las paradas frecuentes del equipo, por el motivo de una rotura imprevista lo que disminuye el proceso de producción de la planta.

3.6. Valoración Medioambiental

La protección del medio ambiente se ha convertido, en los últimos años, en una de las cuestiones que más inquietan a la humanidad. Los grandiosos medios técnicos de que dispone el hombre para explorar las riquezas naturales, el acelerado desarrollo de la economía y el crecimiento de la población, han dado lugar a consecuencias indeseables

para la humanidad, tales como: el agotamiento de los recursos naturales, la contaminación ambiental, los ruidos, la pérdida de los valores estéticos del medio circundante y la merma acelerada del fondo genético, entre otros. No es por lo tanto casual que las organizaciones científica, sociales, políticas, los estados y gobiernos de muchas partes del mundo se hayan preocupado por tomar medidas que, de una forma u otra, están dirigidas a garantizar un uso racional de los recursos naturales y la protección del medio ambiente.

En dicha planta se encuentran esparcidos, permanentemente, polvos de minerales lateríticos y de minerales reducidos.

Aunque estos dos tipos de polvos tienen como contenido mineralógico, fundamentalmente en Ni y el Fe, sus características químicas-físicas son bastantes diferentes y cada cual influye de manera diferente en el organismo humano provocando afectaciones a las vías respiratorias y fundamentalmente a los pulmones.

3.6.1. Influencia del polvo sobre el organismo humano

El estado de salud del trabajador depende en gran medida de las condiciones de trabajo, su entorno laboral y su labor específica, pues en este medio es donde el mismo se expone a los diferentes contaminantes, entre los que se encuentran el polvo industrial, ruidos, gases, etc.

Estos influyen sobre los materiales, entre los efectos que pueden tener sobre estos tenemos:

Abrasión: Realizada por aquellas partículas de mayor tamaño y dotadas de elevadas velocidades (efecto de pequeña incidencia).

Ataque químico: Puede realizarse directamente por las partículas o generalmente por los gases existentes conyugalmente tras el efecto de abrasión realizado por las partículas.

Sin embargo cuando se habla del organismo humano, la situación se torna más preocupante, ya que lo afecta directamente en mayor o menor medida. Los contaminantes penetran al organismo principalmente por dos vías:

- Inhalación de polvos en el aire a través de las vías respiratorias.

- Absorción de polvo a través de la piel.

De acuerdo con la forma de acción biológica sobre el organismo humano, los polvos industriales se clasifican en:

Polvos inertes: Son aquellos que no provocan reacción aparente en los depósitos linfáticos pulmonares, pero obstruyen el flujo normal de la linfa.

Polvos tóxicos: Son los que ocasionan daños en uno o varios órganos y sistemas linfáticos pulmonares, pero obstruyen el flujo normal de la linfa.

Polvos alérgicos: Son los causantes de afecciones alérgicas, sus efectos dependen en gran medida de la susceptibilidad del individuo.

Polvos fibrogénicos: Ocasionan fibrosis pulmonar característica de la neumoconiosis.

3.6.2. Medidas de prevención que se deben seguir para evitar estos riesgos

1. Las tuberías, equipos y accesorios que tengan o transporten sustancias calientes (petróleo, vapor, gases, mineral, agua). Deben estar debidamente aislados y protegidos.
2. No permitir la explotación de ductos, bombas, ventiladores, enfriadores (y otros equipos similares) que tengan salideros de mineral, vapor, petróleo, gases, aire y agua calientes.
3. Utilice guantes y espejuelos protectores para inspeccionar regular, manipular equipos, dispositivos o elementos calientes incluyendo las tareas de inspección, mantenimiento y limpieza de platos, piedras de combustión, quemadores, las tareas de chequear, sacar o poner brazos y dientes, rastrillar hogares, inspección y mantenimiento del alimentador Grizzli.
4. Emplear los métodos correctos para manipular, regular, abrir, cerrar, inspeccionar, cambiar, limpiar equipos y dispositivos que tengan o transporten mineral, vapor, petróleo, gases, aire y agua caliente.

3.7. Conclusiones del Capítulo III

1. Se demuestra a través de la modelación que para el material homogenizado ambas piezas resisten la condición de resistencia teniendo en cuenta todos los parámetros analizados. Influyendo en esto la forma geométrica de ambos tramos.
2. Existen altos grados de contaminación en dicha planta debido a los desprendimientos efluentes que segrega la misma. Esto influye gravemente en la población del municipio de Moa, afectando a dichos pobladores.
3. El importe de la aleación para el material viejo tiene un valor de \$8836.56 CUC para el tramo de la ECG y para el tramo de la RRL tenía un costo de \$11473.72 CUC. Para el material propuesto tiene un precio de \$8527.21 CUC para el tramo de la ECG y para el de la RRL tiene un valor de \$11072 CUC. Por lo que se hace factible una vez más la homogenización de dicho material propuesto; disminuyendo este el costo de fabricación de los tramos.

CONCLUSIONES GENERALES

Conclusiones:

1. Este tipo de rotura se desarrolla gradualmente y no de forma inmediata. El origen de estas puede estar dado por diferentes causas como las mencionadas anteriormente.
2. Quedó establecido el procedimiento de cálculo para conocer las tensiones que actúan durante el funcionamiento de los tramos de árboles centrales analizados.
3. Los cálculos de resistencia para ambos tramos se realizaron teniendo en cuenta las condiciones de operación, la geometría y las cargas a las que están sometidos. Se compararon las tensiones actuantes con las admisibles del material homogenizado. Ambos tramos resisten para todos los parámetros analizados.
4. Las empresas con esta sustitución del material se pueden ahorrar un gasto de, para el caso de la ECG se ahorra \$ 309.35 CUC y para el caso de la RRL es de \$ 401.72 CUC.
5. Los resultados obtenidos en la simulación permitieron conocer cual de las dos tecnologías es la más factible para la homogenización. Debido a esto y a las pruebas que se han sometido ambas tecnologías se definió que la geometría del tramo de la empresa "Ernesto Ché Guevara" es la mejor, ya que en esta se disminuye el costo de fabricación de los mismos para las empresas con tecnologías Caron en Cuba.
6. Existen altos grados de contaminación en la planta debido a los polvos de minerales lateríticos, polvo de minerales reducidos y el alto nivel de ruido que existe en la misma. Estas contaminaciones tienen gran influencia en la salud de los obreros y en el pueblo de Moa.

RECOMENDACIONES

Se crean las siguientes recomendaciones por la importancia del...

Dada la importancia del tema y los pocos conocimientos existentes de este, sugerimos que:

1. Realizar un estudio más profundo sobre el tema, debido a la importancia que este tiene para el funcionamiento de las tecnologías Caron Cubana.
2. Verificar que se cumplan las normas de protección del Medio Ambiente y del trabajador exigiéndole a estos los dispositivos que exige cada área.
3. No dejar nunca la llama del quemador de la cámara de combustión directamente sobre los tramos de dicho árbol, cuando está parado.
4. Proveer a las instalaciones de dicha planta de equipos de mediciones que registren datos reales de los procesos que ocurren durante el funcionamiento del árbol central durante su funcionamiento.
5. Marcar los tramos que se fabriquen con el material homogenizado para saber el tiempo de explotación de los mismos, cuando salgan de funcionamiento.
6. Realizar un estudio sobre el posible cambio de las posiciones de los nervios de los tramos de la "RRL".
7. Analizar otro procedimiento de cálculo que se pueda utilizar para darle solución al objeto de estudio.