República de Cuba
Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"
Facultad Metalurgia Electromecánica
Departamento de Mecánica

Trabajo de Diploma

En opción al Título de Ingeniero Mecánico

Tema: Modificación de los brazos de hornos de soleras múltiples de la UBP Hornos de reducción de la ECG.

Autor: Fidel Pérez Vargas

Tutores: Dr. C. Isnel Rodríguez González.
Ms.C. Geovany Ruiz Martínez.

"Año 54 de la Revolución"
Moa - 2012

Declaración de Autoridad

Yo: Fidel Pérez Vargas

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez" el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

_____ _____

Autor: Fidel Pérez Vargas Dr. C. Isnel Rodríguez González

_____

Ms. C. Geovany Ruíz Martínez

Agradecimientos

A mis padres Roberto Luís Pérez y Elba Vargas por su apoyo incondicional.

A mi adorada novia Yitsy Legrá por alentarme día tras día.

A mis hermanos, mis compañeros de aula.

A mis amigos Pedro Guilarte, Ingeniero Orlando Vega, Ms. C. Rodney Correa.

A mis tutores Dr. C. Isnel Rodríguez y al Ms. C. Geovany Ruíz por facilitar la terminación de este trabajo, al claustro de profesores del departamento de mecánica.

A los que de una forma u otra contribuyeron a la realización de este trabajo.

A todos muchas gracias

Dedicatoria

A nuestra Revolución, por todas las oportunidades que me ofrece.
A mi familia y amigos.
A todos los centros de investigación del níquel.

Pensamiento

Una teoría impresiona tanto más,

Cuanto más simples son sus premisas,

Más diversas las materias que liga

Y más amplio su campo de aplicación.

Albert Einstein

Resumen

En el presente trabajo se verifica la resistencia mecánica de los brazos mecánicos del mecanismo de barrido de los Hornos de Reducción fabricados con acero inoxidable HK 40, se muestran las propiedades químicas del material para el control de sus elementos químicos. Con el análisis tenso - deformacional se comprobó la resistencia de los brazos obteniéndose como tensión máxima inferior a la tensión admisible del material a la temperatura máxima de trabajo. En la sección más pequeña de la pieza.

Se identifican como factores de gran influencia en la rotura el excesivo contenido de carbono en los dientes que promueven la formación de carburos en el borde de los granos del material y la presencia de cuerpos extraños (clinker y/o ladrillos del revestimiento de los hornos) que se desprenden durante las operaciones. Para la obtención de los resultados se utilizaron los programas MathCAD Proffesional y ANSYS (V.11.0). Se efectuó la valoración de los resultados obtenidos, impacto económico y el impacto ambiental de la planta.

Abstract

In the presently work is verified the mechanical resistance of the mechanical arms of the mechanism of sweeping of the Ovens of Reduction fabricated with stainless steel HK 40, they are shown the chemical estates of the material as well as a realized experiment with the estates. With the analysis tense-deformational he was proven the resistance of the arms obtaining you as inferior maximum tension to the acceptable tension of the material to the working maximum temperature. But showing the dangerous sections.

They are identified as factors of great influence in the break the excessive content of carbon in the teeth that promote the formation of carbides in the border of the grains of the material and the presence of foreign bodies (clinker and/or bricks of the lining of the ovens) that come off during the operations. For the obtaining of the results the programs MathCAD Proffesional and ANSYS (V. 11. 0) was used. He is carried out the valuation of the obtained results, I impact economic and the environmental impact of the plant.

Índice

Contenido

	Pág.
INTRODUCCION	**I**
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN	**1**
1.1. Introducción	**1**
1.2. Estado del Arte	**1**
1.3. Propiedades del material según los elementos de aleación	**3**
1.3.1. Aceros inoxidables	**4**
1.3.1.2 Aceros inoxidables austeníticos	**4**
1.4 Composición química estándar del acero austenítico AISI 310 (HK40)	**6**
1.5 El problema de la fragilidad en los aceros inoxidables austeníticos	**8**
1.6 La fluencia lenta en los aceros austeníticos termo-resistentes.	**12**
1.7 Clasificación de los Hornos Metalúrgicos	**14**
1.7.1 Proceso tecnológico de la Planta Hornos de Reducción	**15**
1.8 Mecanismos de arrastre y removedores	**17**
1.9 Método de elementos finitos para resolver problemas de ingeniería	**17**
1.10 Estado tensional y deformacional	**18**
1.10.1 Solicitaciones mecánicas	**19**
1.11 Conclusiones del capítulo	**21**
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS	**22**
2.1. Introducción	**22**
2.2 Disponibilidad de los brazos	**22**
2.2.1 Diseño de los brazos para las nuevas condiciones de trabajo	**22**
2.3 Selección del material	**23**
2.3.1 Análisis químico y determinación de elementos de aleación (Análisis espectral)	**23**
2.4 Análisis tenso - deformacional mediante métodos numéricos	**24**
2.4.1 Cálculo del volumen del brazo	**24**
2.4.2 Cálculo de la masa y el peso	**26**
2.4.3 Cálculo del área de la sección transversal	**27**
2.4.4 Momento torsor que actúa sobre los brazos	**27**

2.4.5 Comprobación de la resistencia a la flexión 27
2.4.5.1 Cálculo de la carga admisible 27
2.4.5.2 Deflexión máxima 28
2.4.6 Análisis cinemático y dinámico de los hornos de reducción 29
2.4.6.1 Relación de transmisión del reductor 29
2.4.6.2 Relación de transmisión Polea – Correa 29
2.4.6.3 Relación de transmisión del engranaje cónico 30
2.4.6.4 Rendimiento total 31
2.4.6.5 Cálculo de la potencia del eje central (máquina) 31
2.4.7 Cálculo de la fuerza de fricción que actúa sobre los brazos 31
2.5 Modelación y simulación por el Método de Elementos Finitos 32
2.5.1 Simulación por el MEF 32
2.5.1.1 Condiciones y parámetros establecidos 33
2.5.1.2 Algoritmo para la simulación 33
2.6 Costo de fabricación 34
2.6.1 Calculo de costo 35
2.7 Conclusiones del capítulo 35
CAPÍTULO III: VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS 36
3.1 Introducción 36
3.2 Disponibilidad de los brazos 36
3.3 Diseño de los nuevos brazos 36
3.3.1 Análisis químico 36
3.4 Análisis de la resistencia 37
3.5 Análisis cinemático y dinámico 39
3.6 Resultados de la aplicación del MEF al diseño obtenido 39
3.7 Costo de fabricación 41
3.7.1 Costo de maquinado 41
3.7.2 Costo de fundición 42
3.8 Impacto ambiental 44

3.8.1 Impactos ambientales generados por la Planta Hornos de Reducción 44

3.9 Conclusiones del capítulo 45

CONCLUSIONES GENERALES 46

RECOMENDACIONES 47

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 48

ANEXOS 51

INTRODUCCIÓN

La Industria Cubana del Níquel desempeña un papel importante dentro de la economía nacional, es por ello que el incremento de la eficiencia de cada uno de los procesos, que ocurren en las diferentes plantas e instalaciones que la componen, incide considerablemente en la reducción del consumo de portadores energéticos. Es imprescindible para el país el desarrollo de tecnologías que permitan más ahorro de recursos, menos gasto de energía y menos contaminación atmosférica y que se logre mediante el incremento de la eficiencia y el uso racional de los recursos, evitando la importación de productos altamente costosos.

Los aceros en la industria minero-metalúrgica tienen una amplia utilización en la fabricación de los brazos y dientes del mecanismo de barrido de los hornos de reducción de la Planta de Hornos de Reducción en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Los brazos están conformados por el acero HK40 y es fabricado en la empresa Mecánica del Níquel mediante el proceso de fundición y luego llevado al taller de maquinado para un acabado superficial.

La Planta de Hornos de Reducción tiene como función la reducción de los óxidos de níquel y cobalto, mientras que los óxidos de hierro se reducen hasta hierro metálico, y 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.

Según Velásquez Alberto, (2002), los Hornos de Reducción para la obtención de Ferro Níquel de la empresa Ernesto Che Guevara, están compuestos por un cilindro metálico vertical de 15 m de altura revestido interiormente con ladrillos refractarios y exteriormente con una carcasa metálica, sistemas de alimentación, barrido, descarga y cámaras de combustión. Los hornos están provistos de 17 hogares o soleras en forma de bóvedas esféricas a través de los cuales circula la carga (mena) que, proveniente de la planta de secaderos, se le suministra al horno por la parte superior a través de un alimentador sinfín.

Existen en la planta un total de 24 hornos agrupados en 3 tres lozas de 8 hornos cada una. La homogeneización y arrastre de la carga dentro del horno se garantiza con un sistema de 68 brazos (4 en cada hogar) acoplados a un árbol central hueco.

Los brazos tienen dispuestos dientes o paletas inclinadas que propician la descarga del mineral por la periferia o por el centro del horno en forma de zigzag.

Se han reportado muchos paros de instalaciones de lozas de hornos donde han ocurrido roturas repentinas de brazos originadas, en ocasiones, por la presencia de objetos extraños como fragmentos de clinker, ladrillos desprendidos del revestimiento y dientes partidos que han provocado roturas por sobrecarga.

Sin embargo, esta no ha sido la principal causa de roturas de los brazos mecánicos durante las operaciones.

Los dientes del brazo tanto como el brazo en general están en el proceso de trabajo sometidos a grandes temperaturas y a gases reductores producto de la combustión y del petróleo aditivo que se añade al mineral en la planta de secado.

Por tanto se establece la siguiente **situación problémica:**
La fractura de los brazos conjuntamente con los dientes del mismo conlleva a su cambio excesivo, incumpliendo con su tiempo de vida útil, ocasionando frecuentes variaciones en el flujo productivo, aumentando el costo y la utilización de personal que debe someterse a sustancias tóxicas, por lo que es necesario el rediseño de los brazos y su comprobación de resistencia.

El **problema** está constituido por lo siguiente:

Inadecuada forma geométricas de brazos mecánicos en los hornos de soleras múltiples que provocan su rotura en la Unidad Básica Productiva Hornos de Reducción de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Dado el problema se presenta la siguiente **hipótesis:**
Si se hace un análisis de la resistencia mecánica actual de brazos mecánicos en los hornos de soleras múltiples, se podrá conocer su punto de rotura, lo que permitirá un diseño más racional de esos elementos de manera tal que se incremente su disponibilidad.

Se define como **objetivo general:**
Verificar si la resistencia de los nuevos brazos mecánicos es adecuada para su funcionamiento en la planta Hornos de Reducción de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Objetivo específico:

1. Analizar el comportamiento de los esfuerzos de tensión en los brazos de la planta Hornos de Reducción de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.
2. Establecer los métodos para el análisis de esfuerzos a partir del empleo de técnicas computacionales.

Se plantean las siguientes **tareas**:

1. Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con los aceros resistentes a elevadas temperaturas,
2. Realización de los cálculos de resistencia mecánica de los brazos de la planta Hornos de Reducción de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara,
3. Realización de la simulación de los brazos mecánicos para definir su resistencia,
4. Propuesta de soluciones constructivas,
5. Valoración de resultados.

CAPÍTULO I

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

Toda investigación debe estar sustentada por un análisis científico, teórico y empírico donde se utilicen métodos que cumplan con los objetivos del problema, hipótesis y tareas.

En el presente capítulo se mostrarán una serie de aspectos relacionados con la temática que se tratará en este trabajo de diploma, los mismos son resultado de una búsqueda bibliográfica basada en la obtención de información acerca del régimen de trabajo y cálculo de los brazos mecánicos de la planta Hornos de Reducción de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Objetivo del capítulo:

Establecer el estado del arte relacionado con los brazos mecánicos de la planta de hornos de reducción de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

1.2 Estado del Arte

Los factores que contribuyen de manera aislada o conjunta en la disminución de la resistencia de elementos que trabajan a elevadas temperaturas son varias, provocan la aparición de deformaciones en las piezas y roturas, sin embargo existe una que predomina y constituye un factor común en las fallas ocurridas a elevadas temperaturas: las inestabilidades metalúrgicas.

Las inestabilidades metalúrgicas son los cambios que ocurren en las estructuras metalográficas originadas por permanencia a altas temperaturas que modifican y disminuyen las propiedades del metal que lo caracterizan, y ocurre la aparición de estructuras anómalas formando focos que incluyen transiciones de fracturas transgranulares a intergranulares, recristalización, envejecimiento, precipitación o descomposición de fases, retardo de las transformaciones en el equilibrio de fases, oxidación, corrosión intergranular, agrietamiento por corrosión bajo tensión y contaminación por trazas de elementos, entre otras (Saxena, 1998; Beddoes y Gordon, 1999).

Las causas de roturas en hornos industriales en condiciones de servicio han sido muchas: la fragilización en caliente por procesos de solidificación, envejecimiento, fluencia, fatiga o corrosión entre otras.

Los problemas de las roturas de los aceros laminados es que a diferencia de los fundidos, presentan bajo contenido de carbono constituyendo este un elemento fundamental en las propiedades mecánicas y tecnológicas de las aleaciones.

Velázquez et al. (2001), evalúa el comportamiento de los aceros austeníticos fundidos AISI HH y HK 40 (producidos en el país) ante los procesos de carburización y nitruración en los rangos de temperaturas que varían desde 750 hasta 1 000 °C. Estudia la cinética y la termodinámica de las posibles reacciones, y los productos de las mismas se caracterizan mediante técnicas de Microscopía Óptica.

Plantea que el aumento del contenido de níquel incrementa la resistencia a la carburización y a la nitruración al disminuir los valores de los coeficientes de difusión del carbono y el nitrógeno en la matriz austenítica, la aleación HK 40 muestra mejor resistencia a la carburización y a la nitruración, lo que hace factible su empleo en componentes de hornos de soleras múltiples para la reducción de minerales lateríticos.

Pardo (1993), reporta casos de rotura en componentes fabricados con aceros HK 40 pero en fallas inducidas por corrosión de la aleación en presencia de la mezcla 82 % K2SO4 - 18 % V2O5 a temperaturas de 560 - 820 ° C.

Domínguez (1995) y Prevot (1994) han atribuido el fenómeno de la rotura de brazos fabricados con la aleación HH en presencia de entallas mecánicas (defectos de fundición) y sobrecargas de mineral durante las operaciones. Exponen teóricamente, en ausencia de cálculos verificativos de resistencia, las consecuencias de las sobrecargas producidas sobre las operaciones.

La Industria de la Fundición en Cuba ha adquirido un mayor desarrollo en los últimos años destacándose de manera significativa la empresa Antillana de Acero (ACINOX), la cual cuenta con una amplia gama de producción de objetos de este tipo.

En la Provincia de Holguín, específicamente en el municipio de Moa, se cuenta con uno de los organismos empresariales que más aporta a la economía nacional, el combinado mecánico de la Empresa Mecánica del Níquel (EMNI) “Cdte. Gustavo Machin de Beche”, en él que se fabrican la mayoría de los elementos (maquinarias y equipos) que funcionan en las empresas, no solo del territorio sino también del resto

de la provincia. Ejemplo están los brazos mecánicos de los hornos de reducción de las empresas ECG y RRL, los cuales se obtienen mediante el proceso de fundición.

1.3 Propiedades del material según los elementos de aleación

Los componentes químicos según confieren diversas cualidades físicas, químicas y mecánicas a los aceros mejorando sus cualidades, en dependencia del elemento y de su cantidad dentro de la aleación, o en detrimento de las mismas.

El carbono es el ingrediente fundamental en el acero, ejerce una gran influencia sobre las propiedades físicas y mecánicas del acero. Eleva su resistencia, dureza y templabilidad.

El cromo origina la formación de diversos carburos de cromo que son muy duros; sin embargo, el acero resultante es más dúctil que un acero de la misma dureza, producido simplemente al incrementar su contenido de carbono. La adición de cromo amplía el intervalo crítico de temperatura.

El níquel amplía el nivel crítico de temperatura, no forma carburos u óxidos. Esto aumenta la resistencia mecánica sin disminuir la ductilidad. El cromo se utiliza con frecuencia junto con el níquel para obtener la tenacidad y ductilidad proporcionadas por el níquel, y la resistencia al desgaste y la dureza que aporta el cromo. En la deformación en frío aumenta la resistencia y conformabilidad del acero.

El manganeso se adiciona a todos los aceros como agente de desoxidación y desulfuración, pero si el contenido de manganeso es superior al 1 %, el acero se clasifica como un acero aleado al manganeso. Reduce el intervalo crítico de temperaturas.

El silicio eleva la resistencia, la elasticidad y la conductividad magnética del acero. Un elevado contenido de silicio en el acero dificulta la conformación del acero.

El molibdeno forma carburos y también se disuelve en ferrita hasta cierto punto, de modo que intensifica su dureza y la tenacidad. El molibdeno baja sustancialmente el punto de transformación. Debido a esto, el molibdeno es de lo más eficaz para impartir propiedades deseables de templabilidad en aceite o en aire.

El azufre forma con el hierro combinaciones químicas, sulfuros de hierro, que hacen que el acero calentado al rojo sea quebradizo. Este elemento es perjudicial en el proceso de tratamiento térmico, el mismo se disuelve en el hierro, no obstante en el

conformado en frío no hay elevadas temperaturas que provoque una alteración en la formación de fase.

El fósforo se encuentra siempre disuelto en los granos de ferrita a los que comunica gran fragilidad. Es un elemento perjudicial porque reduce considerablemente la tenacidad y origina fragilidad en frío.

1.3.1 Aceros inoxidables

Los aceros inoxidables son aleaciones complejas en las que entran en juego múltiples elementos. El porcentaje de estas partículas y su variación cambian la porción de las fases presentes, lo cual da lugar a cinco diferentes familia; cuatro de éstas corresponden a las particulares estructuras cristalinas formadas en la aleación: austenita, ferrita, martensita, y dúplex (austenita más ferrita); mientras que la quinta familia son las aleaciones endurecidas por precipitación, que están basadas más en el tipo de tratamiento térmico usado que en la estructura cristalina.

1.3.1.2 Aceros inoxidables austeníticos

La adición como mínimo de 8% de níquel a un acero con 18% de cromo lo transforma en austenítico manteniendo sus características de inoxidabilidad. Estas y otras modificaciones, constituyen la serie 300 de la familia de aceros inoxidables austeníticos o también llamados al cromo - níquel.

En la siguiente figura se muestra una serie de diagramas de equilibrio Fe - C con 18% de Cromo y contenidos crecientes de níquel, mostrando a su vez la influencia del níquel para expandir el campo. Se puede observar del diagrama que a temperatura ambiente solo se encuentra austenita y carburos, de hierro y de cromo, dependiendo de la cantidad de carbono de la aleación.

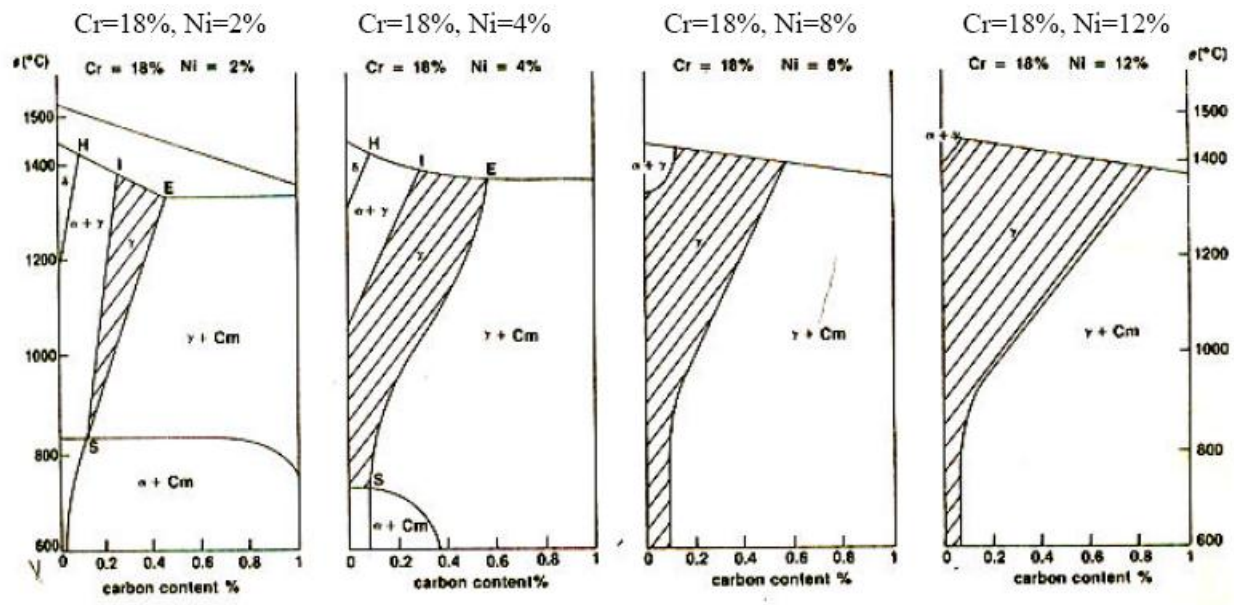


Figura 1.1 Influencia del níquel en la fase gamma de un acero con 18 % de Cr. (Rodríguez, 2009)

Los aceros inoxidables austeníticos constituyen la familia con el mayor número de aleaciones disponibles, integra las series AISI 200 y 300. Su popularidad se debe a su excelente formabilidad y superior resistencia a la corrosión, no son templables, presentan buena ductilidad y son fácilmente soldables (Beddoes y Pardo, 1999).

Los aceros austeníticos se dividen en dos categorías:

- ✓ Serie AISI 200. Aleaciones cromo-manganeso-nitrógeno.
- ✓ Serie AISI 300. Aleaciones cromo-níquel.

Serie AISI 200

Son aleaciones Cr-Mn-Ni y representan la más reciente adición a la familia austenítica. Contienen menor cantidad de níquel hasta 7 % y mantienen la estructura austenítica con altos niveles de nitrógeno. El manganeso de 5 a 20 % es necesario en estas aleaciones bajas en níquel para aumentar la solubilidad del nitrógeno en la configuración austenítica, además de prevenir la transformación a martensita. La adición de nitrógeno también incrementa la resistencia mecánica.

Serie AISI 300

Es la más extensa y son aleaciones Cr - Ni. El níquel es un elemento estabilizador o formador sustitucional de austenita, y se emplea con este propósito en un porcentaje de 4 a 37 %. La serie AISI 300 mantiene alto contenido de níquel y hasta 2 % de manganeso. También pueden contener molibdeno, cobre, silicio, aluminio, titanio y

niobio, elementos que son utilizados para conferir ciertas características, como podría ser el prevenir en las estructuras soldadas la corrosión en la región cercana a la soldadura. En ciertos tipos se usa azufre o selenio para mejorar su habilidad de ser maquinados. Los aceros inoxidables 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. Investigaciones realizadas por la Alloy Casting Institute (ACI) determinaron la importancia del aumento del contenido de carbono para aceros de la serie 300 para el aumento de la rigidez y elevar la resistencia mecánica de elementos muy cargados a altas temperaturas, surgiendo así la serie H (Peckner, 1994).

La elevada producción a nivel mundial de aceros austeníticos inoxidables se justifica en las innumerables aplicaciones de ciertos materiales por su resistencia a la corrosión a grandes temperaturas.

1.4 Composición química estándar del acero austenítico AISI 310 (HK40)

La composición química estándar de este acero austeníticos AISI 310 según Databook (1988) y editada por la American Society for Metals, según el Alloy Casting Institute (ACI), muestra la designación adoptada por la AISI y SAE, las cuales a su vez, coinciden con el sistema de numeración Unified Numbering System – UNS, de la American Society for testing Materials – ASTM y la SAE.

El diseño original previó a la fabricación de los dientes con el acero fundido 40Х24Н20С2Л, designado por la norma GOST. Este acero que es equivalente al acero fundido HK 40.

Según Velásquez Alberto (2002), citado por Leyva Darlin (2010) el material establecido por diseño, según la norma GOST es 40Х25Н20С2Л, con un contenido de carbono de hasta un 40%, 25% de cromo, 20% de níquel, 2% de silicio y debe ser fundido. En los ensayos realizados a las muestras aleatorias de algunos de los brazos fabricados en el CMNI, se observa un buen comportamiento del componente carbono, no excediéndose de las normas establecidas por diseño, de igual manera es el caso del cromo. El caso del silicio se observa una alteración de los valores desde 0.1 – 0.6 % y el caso del níquel con valores inferiores a los establecidos entre -0.4 - -0.1 disminuyendo la resistencia y la tenacidad en el metal, pero llamamos la atención en el azufre, el cual exhibe valores excesivamente alto, lo que provoca fragilidad del metal en estos contenidos mayores que 0.02%. Lo anterior permite

señalar que los componentes de mayor incidencia lo constituyen el silicio, el níquel y el azufre, todos los cuales garantizan la disminución de la resistencia del material.

Según el diagrama (Qiu, 1993b), la ausencia total de la fase ferrítica de solidificación en aceros austeníticos fundidos de la serie H se garantiza para contenidos de níquel superiores al 22 %, aun cuando la cristalización ocurra en condiciones de desequilibrio.

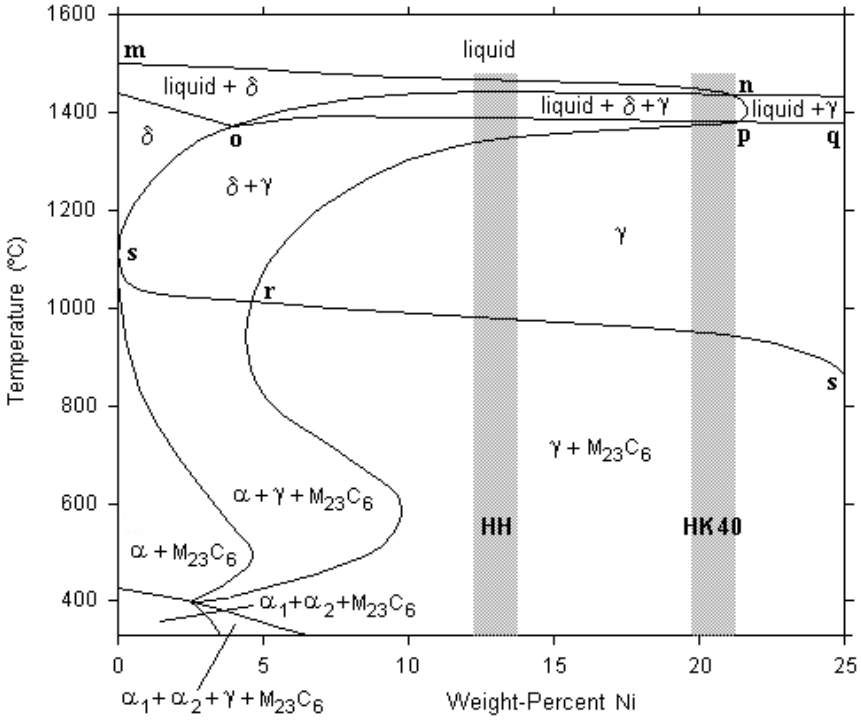


Figura 1.2: Sección vertical del sistema Fr-Cr-Ni-C calculado para 24 % Cr y 0.4 % C. (Rodríguez, 2009).

Velázquez (2002) plantea que la línea n- p-r-s marca el límite de estabilidad de los cristales de δ-ferrita en las aleaciones con contenidos de níquel hasta 21 %, aproximadamente, por lo que toda aleación cuya composición esté a la derecha de n-p solidifica con la precipitación de cristales de Fe–γ. En este caso, las posibilidades de retención de δ-ferrita de solidificación son nulas, independientemente de las condiciones de enfriamiento.

A pesar de que para aleaciones con contenidos aproximados de níquel hasta 21 % es posible la presencia de la δ-ferrita después de la fundición, es poco probable que a temperaturas inferiores a 477 ºC se promueva la precipitación fases sigma a partir de la δ-ferrita de solidificación si se tienen en cuenta las soluciones obtenidas para la expresión (37) y los resultados de los cálculos termodinámicos realizados por Qiu

(1993b). Entonces, es recomendable el empleo de una aleación con menores contenidos de níquel en su composición y por tanto, menos costosa, para la fabricación de los brazos destinados a operar en los hogares cuyas temperaturas son inferiores a 477 ºC. Para los hogares que operan a temperaturas superiores a 477 ºC se debe utilizar una aleación con mayores contenidos de níquel y por consiguiente, menos propensa a la precipitación de fases sigma.

Es importante tener como referencia la aleación HK 40 fundida por la Empresa Mecánica del Níquel en Nicaro (20% Ni - 26% Cr), pues a pesar de poseer contenidos de níquel similares a la HK 40 fundida en Moa (20%Ni - 24%Cr), proporciona mayores índices de durabilidad de los brazos para condiciones de carga similares. Esto responde, principalmente, a los efectos positivos del incremento en los contenidos de cromo sobre las propiedades de termo-resistencia (termofluencia) en el material.

1.5 El problema de la fragilidad en los aceros inoxidables austeníticos

Existen muchos factores que pueden contribuir de manera aislada o conjunta en la disminución de la resistencia de los elementos originando las roturas; sin embargo, existe uno que predomina y generalmente constituye un factor común en las fallas ocurridas a elevadas temperaturas: *las inestabilidades metalúrgicas*.

Se denominan inestabilidades metalúrgicas a los cambios que ocurren en la estructura metalográfica originados por permanencias a altas temperaturas. Estas inestabilidades provocan focos que incluyen transiciones de fracturas transgranulares a intergranulares, recristalización, envejecimiento, precipitación o descomposición de fases, retardo de las transformaciones en el equilibrio de fases, oxidación, corrosión intergranular, agrietamiento por corrosión bajo tensión y contaminación por trazas de elementos, entre otras (Saxena, 1998; Beddoes y Gordon, 1999). Cuando un material es muy propenso a estos cambios a elevadas temperaturas, se modifican y disminuyen las propiedades que lo caracterizan por el surgimiento o aparición de estructuras anómalas.

La existencia de estas estructuras anómalas frecuentemente son las causantes de roturas imprevistas. Ellas pueden actuar de manera independiente o interactuar bajo la influencia de otros factores (temperatura, sobrecargas) incitando cambios en las características de las fracturas.

La fragilización en caliente de aceros austeníticos es un fenómeno muy investigado desde la década de los 50. Roturas catastróficas producidas en tuberías, depósitos, recipientes a presión, equipos para el trasiego de fluidos y otros muy comunes en plantas químicas, energéticas y metalúrgicas, han dado lugar a que se destinen cuantiosos medios y recursos al estudio de la relación entre el carácter de la rotura de elementos fabricados de aceros austeníticos inoxidables y su microestructura (Lai 1992).

Muchas han sido las causas aparejadas a roturas de componentes de hornos industriales en condiciones de servicio, sin embargo, la más común encontrada en la literatura es la fragilización en caliente por procesos de solidificación, envejecimiento, fluencia, fatiga o corrosión bajo tensión.

Naumann (1998), realiza un análisis de la problemática planteando que la falla de componentes de hornos como bandejas, soportes y mecanismos agitadores está asociada a la fragilización por precipitación de fases producto del envejecimiento, pero sin llegar a realizar un estudio detallado del fenómeno.

Estudios de fallas de aceros austeníticos por precipitación de fases sigma bajo condiciones de operación en plantas petroquímicas, del cemento y hornos para tratamiento de metales fueron realizados por Mazorra *et al*., 1989 b; Powell *et al*., 1995; Million *et al*., 1997 y Zhang (1999); pero solo se refieren componentes fabricados con aceros de las series 200 y 300 del American Iron and Steel Institute (AISI).

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.

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 creep (fluencia y a la presencia de fases sigma, sus resultados sólo se asocian a fallas ocurridas en uniones soldadas.

La fase sigma se detectó por primera vez en 1907 al observarse escalones térmicos en curvas de enfriamiento de aleaciones Fe-Cr. Desde un principio se supuso que la formación de estos escalones térmicos estaba originada por la precipitación de un compuesto intermetálico del tipo Fe_nCr_m, lo que posteriormente se corroboró por Maurer y Strauss en 1927, quienes la identificaron empleando técnicas de difracción por Rayos X (Powell *et al*., 1995).

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.

Como aplicación práctica de estos trabajos, posteriormente Qiu (1993) a y b, obtuvo secciones verticales de diagramas de fases isotérmicos de los sistemas Fe-Cr-C, Fe-Cr-Ni-C y Fe-Cr-Mn-N. En estos trabajos, se evalúan los efectos de los elementos de aleación sobre la precipitación de fases de carburos y fases sigma y se proponen modelos estequiométricos basados en la estructura cristalina de las fases y el número de átomos en la red.

El efecto de la precipitación de fases sigma sobre el tiempo de rotura bajo tensión en aceros inoxidables austeníticos laminados se expone detalladamente en ASTM Handbook. Failure Analysis and Prevention, 1996. Aunque se especifican las curvas de fluencia para tiempos de rotura hasta 10 000 horas, sólo se analizan aceros del tipo 17Cr-8Ni-0.05C, 20Cr-8Ni-0.05C y 20Cr-8Ni-0.15C con diversos contenidos de nitrógeno.

Lai (1992); Botella *et al*., 1997-1999 y Bilmes, 2000a, obtuvieron relaciones estequiométricas de fases sigma empleando técnicas de microanálisis en aceros del tipo AISI 309, 310 y 316 sometidos a procesos de oxidación y envejecimiento en condiciones de atmósfera natural a escala de laboratorio durante tiempos de hasta 1000 horas.

Importantes contribuciones al conocimiento de algunas de las regularidades manifestadas en roturas de componentes fabricados con aceros fundidos de la serie H realizan Ebert (1976) y Roach y Van Echo (1981). Como aportes importantes,

Ebert se refiere a problemas de agrietamiento en tubos de hornos de pirólisis fabricados de HK 40 durante procesos de recuperación por soldadura a la intemperie y los efectos de las fases de carburos en la reducción de la ductilidad de la aleación a temperatura ambiente como consecuencia de la exposición de la aleación a elevadas temperaturas durante tiempos prolongados. Por su parte, Roach y Van Echo reportan las propiedades de fluencia de uniones soldadas también en la aleación HK- 40.

Otro acercamiento al conocimiento de las características de los aceros de la serie H después de ensayos de fluencia lo proporciona Davis (1997), al mostrar micrografías de aceros austeníticos fundidos del tipo HH y HK-40 después de ensayos de creep con tiempos de rotura de hasta 1000 horas. En este caso, sólo se reporta la presencia de fases sigma en la aleación HH sin profundizar en otras cuestiones esenciales como la estequiometría, composición y el mecanismo de precipitación, entre otras.

Pardo (1993), también reporta casos de roturas en componentes fabricados con aceros HK 40, pero en fallas inducidas por corrosión de la aleación en presencia de la mezcla 82%K_2SO_4-18%V_2O_5 a temperaturas de 560-820° C. Aunque aquí se establece la cinética de la corrosión de la aleación, no se analizan siquiera los efectos de las temperaturas sobre la microestructura del metal. Mientras que Avery, 1988, se refiere a la microestructura de aleaciones HH y HK 40 después de procesos de carburización, mencionando solamente el fenómeno de precipitación de carburos.

Domínguez (1995) y Prevot (1994), han atribuido el fenómeno de la rotura de brazos fabricados con la aleación HH a la presencia de entallas mecánicas (defectos de fundición) y sobrecargas durante las operaciones. Ambos analizaron teóricamente, en ausencia de cálculos verificativos de resistencia, los efectos de las sobrecargas producidas durante las operaciones debido a la formación y desprendimiento del clinker, el que ofrece gran resistencia al movimiento del mecanismo de agitación sin llegar a establecer relación alguna entre las roturas y la microestructura de la aleación.

Con la implementación del control automatizado de las operaciones de los hornos, se ha podido detectar prematuramente cuándo hay sobrecargas en el sistema e incidir sobre ellas, lo que permitió disminuir en un 28 % el promedio de brazos partidos en los años 1996-1999. No obstante, continúan presentándose dificultades

con la durabilidad de los brazos y, por consiguiente, en la estabilidad de las operaciones y la productividad de los hornos.

Con la incorporación de novedosas técnicas como la Microscopía Electrónica de Barrido y el Microanálisis (MEB-EDAX) al estudio de aleaciones del tipo HH, se ha podido detectar la presencia de fases sigma en muestras de brazos de hornos de reducción averiados durante las operaciones. Después de una minuciosa caracterización, Velázquez *et al*., 2001b plantea que las causas de roturas repentinas de estos elementos, se debe a la combinación de los factores tensión, temperatura y presencia de fases sigma.

En otras investigaciones (Velázquez y Mariño, 1996; Girón *et al*., 1997 y Velázquez y Mariño, 1997) los problemas de roturas de brazos se han asociado con la presencia de entallas mecánicas relacionadas con defectos de fundición. Entre estos últimos se pueden citar: poros, micro y macrogrietas de solidificación e inadecuada calidad de las superficies y entallas metalúrgicas como: composición química fuera de los parámetros establecidos y segregación de fases secundarias.

Como se puede observar, el factor común asociado a las roturas de componentes fabricados de aceros austeníticos ha sido la presencia de fases secundarias, especialmente las fases sigma.

Ante las elevadas frecuencias de roturas producidas en los brazos, se decidió por especialistas de los departamentos de Tecnología y Fundición de la EMNI la sustitución paulatina de la aleación HH por la aleación HK-40, 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.

A pesar de que con el cambio de material se ha aumentado la durabilidad de los brazos, se cuestiona por algunos especialistas y existen criterios diversos sobre la factibilidad de la nueva aleación utilizada, por resultar más cara al poseer casi el doble de níquel en su contenido, citado por (Velázquez 2002).

1.6 La fluencia lenta en los aceros austeníticos termo-resistentes

El establecimiento de una relación funcional sencilla para determinar las propiedades a elevadas temperaturas de los materiales constituye un reto para los

especialistas, fundamentalmente cuando la información y/o la base experimental que se dispone son escasas. Una solución preliminar aproximada en estos casos es la extrapolación para un tiempo mayor de los datos existentes, pero se corren grandes riesgos de no estimar correctamente los valores de resistencia (Van Wershoven, 1999).

Independientemente de los progresos experimentados en el conocimiento teórico de la resistencia mecánica de los metales a altas temperaturas, no existe mejor recurso que seleccionar juiciosamente las tensiones de diseño a partir de los datos experimentales. Sin embargo, con frecuencia, es necesario disponer de datos de resistencia mecánica a temperaturas elevadas para condiciones no ensayadas experimentalmente (Kwon *et al*., 1999).

Al examinar la deformación plástica y el endurecimiento por deformación en frío se puede observar que a cada valor de tensión, le corresponde una determinada deformación. Sin embargo, en realidad cualquier material bajo la acción de una tensión constante puede, en determinadas condiciones, deformarse progresivamente con el tiempo. Este fenómeno recibe el nombre de fluencia (Boyle y Spence, 1989).

Según Brooks y Choudhury (1994) y Brust y Leis (2001), Orowan sugirió en 1947, el tratamiento de la fluencia como resultado del equilibrio entre el endurecimiento por deformación y la inmediata restauración activada térmicamente. Más tarde, en 1950, Cotrell y Aytekin desarrollaron la teoría de la restauración para demostrar las suposiciones de Orowan.

Dorn Dieter (1979) asentó la teoría de la velocidad de reacción aplicada a las experiencias de Cotrell y Aytekin sobre una base física más sólida, observando que experimentalmente se pueden establecer correlaciones entre el tiempo y la temperatura.

Todas estas teorías sustentan el desarrollo de las leyes de la fluencia lenta como proceso térmicamente activado, donde el mecanismo de trepado de las dislocaciones es el proceso que controla la velocidad de fluencia (Velázquez y Mariño, 1999).

Se han sugerido diversas expresiones tiempo-temperatura para predecir el comportamiento en fluencia lenta o rotura a largos plazos a partir de ensayos de

corta duración, siendo la utilización del parámetro de Larson-Miller (LM) el método más difundido y utilizado (Diéter, 1979; Colangelo y Heiser, 1994; Peckner y Bernstein, 1994; Pero-Sanz, 1996 y Davis 1997).

Con el desarrollo de las técnicas de control se han introducido métodos para compensar las variaciones de las dimensiones a lo largo del ensayo, de manera que se puede realizar el ensayo de fluencia bajo condiciones de tensión constante y no de carga constante (ASTM E 139; Ohring, 1995).

Sin embargo, cuando los datos que se requieren son para tiempos de exposición extremadamente grandes, las extrapolaciones que puedan realizarse y las curvas obtenidas son solo de confianza cuando se tiene la seguridad de que los cambios microestructurales que puedan producirse en el material no modifican la pendiente de las curvas, cosa esta poco probable para el caso de la aleación HH por los efectos que tienen las fases secundarias segregadas (Velázquez y Mariño, 1999) y su influencia en los valores de tensiones requeridas para la termofluencia.

Ello significa que al modificarse la estructura de la aleación HH como resultado de la exposición a elevadas temperaturas durante tiempos muy prolongados, también ocurrirá una modificación en la pendiente de la curva, por lo que las extrapolaciones que se realicen no reportarían valores confiables.

Las investigaciones realizadas por el autor (Velázquez y Mariño, 1996-1999; Velázquez *et al*. 2001) y la sistematización de los postulados y teorías relacionados con la precipitación de fases secundarias y su influencia en la rotura de componentes fabricados de aleaciones termo-resistentes, imponen la búsqueda y utilización de métodos alternativos para conocer o predecir los valores de tiempos de rotura más cercanos a la realidad.

1.7 Clasificación de los Hornos Metalúrgicos

Los hornos de la metalurgia no ferrosa se pueden clasificar por los siguientes indicios (Chang Cardona, 1986):

1. Por su aplicación tecnológica: Hornos de secado, de tostación, de fusión, de refinación, de colado, de tratamiento térmico, de calentamiento.

2. Por la fuente de energía: Hornos de combustible carbónico, 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 de calor ocurre separadamente del material procesado y se transmite a este por intercambio de calor, hornos de desprendimiento de calor aislado.
4. Por la forma de la zona de trabajo: Hornos con la zona de trabajo vertical – hornos de cubilote, con la zona de trabajo horizontal – hornos de llama, hornos redondos rectangulares y otros.
5. Por el método de trabajo: Hornos de operación periódica y continua.
6. Por la utilización de calor de los gases salientes: Hornos recuperadores y regeneradores, hornos con calderas, hornos con calentamiento de la carga.

1.7.1 Proceso tecnológico de la Planta Hornos de Reducción

Según Velásquez Alberto (2002), citado por Leyva Darlin (2010) la Planta de Hornos de Reducción está compuesta por un total de 24 hornos de hogares o soleras múltiples agrupados en 3 tres lozas de 8 hornos cada una. La homogeneización y arrastre de la carga dentro del horno se garantiza con un sistema de 68 brazos (4 en cada hogar) acoplados a un árbol central hueco. Los brazos tienen dispuestos dientes o paletas inclinadas que propician la descarga del mineral por la periferia, en los pares, o por el centro del horno, en los hogares impares, en forma de zigzag.

La frecuencia de rotación del árbol central, de 1,4 a 1,5 rev/min, es proporcionada por una transmisión cónica accionada por un electromotor de 20 kW. La energía térmica y los agentes necesarios para la reducción del mineral se obtienen de la combustión de petróleo en las cámaras y del petróleo aditivo que se añade al mineral en la planta de secado. Las cámaras de combustión se disponen en los hogares 6, 8, 10, 12 y 14, a razón de dos cámaras en cada hogar ubicadas simétricamente.

En cada uno de los hogares ocurre una cinética de reacciones químicas que permiten la selección extractiva del níquel y el cobalto y la reducción del hierro. El tiempo de retención de mineral desde que se alimenta hasta que se descarga por la parte inferior del horno es de 90 minutos.

El proceso de reducción es bastante complejo. El mismo es heterogéneo y ocurre fundamentalmente entre la línea divisoria entre las fases sólida y gaseosa. La

velocidad de reacción va a estar determinada principalmente por la difusión del gas al interior de las partículas por la concentración de reductores y la velocidad con que se han desalojado los productos de la reacción.

Los dientes del mecanismo de barrido de los hornos de reducción juegan un papel decisivo en la reducción del mineral. Al mantener en movimiento la mena laterítica, homogenizan y mejoran la influencia de la atmósfera reductora sobre esta con el objetivo de que el proceso ocurra con mayor eficiencia.

Los dientes están formados por una paleta inclinada un ángulo de 30° que empuja el mineral ya sea hacia el centro del hogar o hacia la periferia, sujeta a la base que se une a los brazos, mediante una cola de milano. Las paletas o dientes tienen diferentes longitudes en dependencia de la posición en el brazo y del hogar del horno en que trabajan.

Los dientes de los brazos son de diferentes claves que se ubican en los brazos y en los hogares según una posición establecida. La cantidad de estos por brazos varía entre nueve y catorce según diseño, así como su forma que también varia en dependencia del lugar a colocarse.

Según diseño original la fabricación de los dientes con el acero fundido 40X24H20C designado por la norma GOST es equivalente al acero fundido HK 40 de la Alloy Casting Institute (ACI).

Estudios realizados por Velázquez (2002) demuestran que la utilización de brazos fundidos de acero HH es factible para los hogares del 1 al 4 mientras que para los brazos de los hogares del 5 al 16 se debe utilizar la aleación HK 40.

Figura 1.3 Horno eléctrico de reducción (H.E.R).

1.8 Mecanismos de arrastre y removedores

Los mecanismos de arrastre deberán transmitir el torque requerido para la cara de contacto gire en conjunto con al carcasa del sello. Debe permitir el movimiento axial de la cara rotativa.

Tipos de mecanismos de arrastre.

Figura 1.4 Mecanismos de arrastre mecánicos.

1.9 Método de elementos finitos para resolver problemas de ingeniería

El método de elementos finitos es una herramienta general para la solución de problemas de contorno gobernados por ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales. 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. Las propiedades materiales y relaciones gobernantes en estos elementos se expresan en función de los valores desconocidos en las "esquinas" de los elementos o nodos. (Ingham y Moreland, 1993).

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. No obstante, esta cantidad no es una limitación con las computadoras estándar de hoy. (Ingham y Moreland, 1993).

Las ideas básicas de este método se originaron en avances en el análisis estructural de la industria aeronáutica en la década del '50. En la década del '60 el método fue generalizado para la solución aproximada de problemas de análisis de tensión, flujo de fluidos y transferencia de calor. El primer libro sobre elementos finitos fue publicado en 1967 por Zienkiewicz y Cheung (Cortínez 2006). En la década del '70 el método fue extendido al análisis de problemas no lineales de la mecánica del continuo (Girón 2006). Hoy el método permite resolver prácticamente cualquier situación física que pueda formularse mediante un sistema de ecuaciones diferenciales.

1.10 Estado tensional y deformacional

Caraballo (2006) plantea que las tensiones son resultado de la interacción de las partículas del cuerpo, la cual aparece durante su carga con fuerzas exteriores, tales fuerzas tratan de cambiar la posición de las partículas del cuerpo o provocar su desplazamiento, fenómeno que es contrarrestado por las tensiones que surgen en dicho cuerpo. Estas tensiones en un mismo punto serán, por regla general, diferentes en las distintas direcciones, y solamente en algunos casos de carga pueden ser iguales.

Analizando la tensión de un punto A de un cuerpo cargado, referidos a los planos pequeños perteneciente a dos partes diferentes del cuerpo dividido por la sección I-I que pasa por el punto tenemos que si bajo la acción de las cargas exteriores:

1. Los planos tratan de separarse uno del otro o acercarse, entre ellos surgen correspondientemente las tensiones normales σ de tracción o compresión.

2. Los planos tratan de desplazarse uno con respecto al otro, en ellos surgen las tensiones tangenciales τ

3. Uno de los planos trata de alejarse del otro, manteniéndose paralelo a éste en cualquier dirección arbitraria, en tal plano surgen simultáneamente tanto las tensiones normales σ como tangenciales τ, y su resultante será la tensión p, cuyo vector coincide con esta dirección.

Podemos definir al estado tensional de un punto ETP a todos los valores de tensiones normales y tangenciales que corresponden a los diferentes planos que pueden pasar por dicho punto.

Separando un volumen elemental del material en el contorno del punto analizado en el cuerpo sometido a carga, en los planos que delimita a dicho elemento surgen tanto tensiones normales como tangenciales:

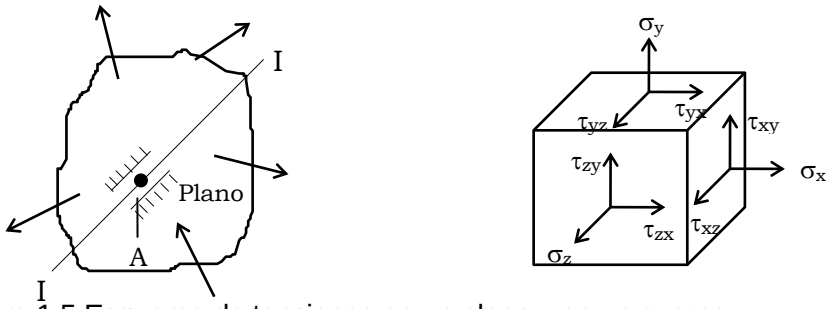


Figura 1.5 Esquema de tensiones en un plano y en un cuerpo.

1.10.1 Solicitaciones mecánicas

Torsión:

Las tensiones son resultado de la interacción de las partículas del cuerpo, la cual aparece durante su carga con fuerzas exteriores, tales fuerzas tratan de cambiar la posición de las partículas del cuerpo o provocar su desplazamiento, fenómeno que es contrarrestado por las tensiones que surgen en dicho cuerpo. Esta tensiones en un mismo punto serán, por regla general, diferentes en las distintas direcciones, y solamente en algunos casos de carga pueden ser iguales (Caraballo 2006).

El estado tensional de la torsión es caracterizado por la presencia en la sección transversal de la barra, del momento torsional Mz = Mtor como único esfuerzo interno; es decir, es el momento que actúa en el plano de la sección transversal de la barra (las demás componentes de las fuerzas interiores son nulas). Una barra está sometida a torsión, si en sus secciones transversales surgen momentos torsores, es decir, momentos que se encuentran en el plano de la sección. La barra que trabaja a torsión se llama árbol. Generalmente estos momentos torsores interiores son consecuencia de momentos exteriores que se transmiten al árbol en lugares donde se colocan poleas, ruedas dentadas, etc. (Ver Figura), (Caraballo 2006).

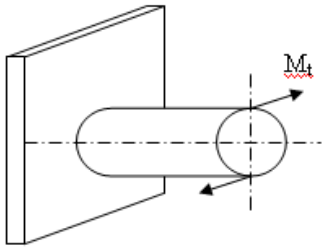


Figura 1.6 Esquema de cuerpo cilíndrico sometido a torsión.

Flexión:

Muy a menudo la barra se somete a la acción de una carga transversal o a la de pares exteriores, cuyo plano de acción pasa por el eje de la barra (como por ejemplo la viga mostrada en la Figura 1). En sus secciones transversales aparecen momentos flectores, es decir momentos interiores que actúan en un plano perpendicular al de la sección transversal de la barra. Cuando actúa este tipo de carga el eje de la barra se encorva. Este tipo de solicitación se denomina **flexión**.

Esta a su vez se clasifica en:

Flexion
- plana
  - transversal
  - pura
- oblicua

Las barras que trabajan principalmente a flexión se denominan comúnmente vigas.

La flexión plana se denomina pura, si el momento flector es el único esfuerzo interno que surge en la sección transversal de la barra.

Con mayor frecuencia, en las secciones transversales de la barra simultáneamente al momento flector, aparecen también fuerzas cortantes, en este caso se denomina flexión plana transversal.

El diseño de una viga consiste esencialmente en seleccionar la sección transversal que proporcione la resistencia más efectiva a la cizalladura y a la flexión producida por las cargas aplicadas.

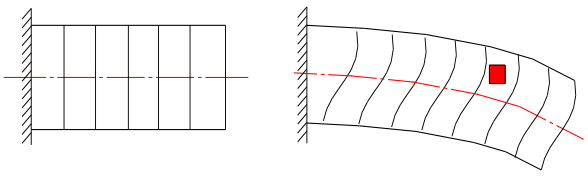


Figura 1.7 Viga flexionada

1.11 Conclusiones del capítulo

1. Se estableció el estado del arte de los brazos mecánicos del sistema de barrido de los Hornos de Reducción.
2. Se realizó una búsqueda de información exhaustiva fundamentando las propiedades y características del material, se explicó el funcionamiento de cada elemento que lo integra.
3. Se plantearon los problemas fundamentales que ocasiona el desperfecto del proceso de barrido de los brazos y dientes que lo forman de la planta de Hornos de Reducción.
4. Se expuso un resumen de las principales características del MEF para resolver problemas de ingeniería.

CAPÍTULO II

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción

El método de comprobación de resistencia de los brazos mecánicos de los hornos de reducción es complejo teniendo en cuenta la resistencia de los dientes y brazos como una sola pieza, por lo que en este capítulo se realizará solo los cálculos más significativos, sin embargo se realizará el cálculo también por el MEF el cuál arrojará los resultados más exactos.

Objetivo del capítulo:

Establecer la metodología de cálculo más significativa de resistencia mecánica así como el MEF.

2.2 Disponibilidad de los brazos

Se realizó el estudio de frecuencia de fallos de los brazos comprendido entre los años 2008 y 2012 según los datos proporcionados por el manual de operaciones de la planta, siendo estos los más actualizados hasta la fecha. Se tomó la cantidad 6848 exacta de brazos rotos en el período de 4 años para obtener el promedio de roturas por año y con ello demostrar la representatividad de las paradas por avería de los hornos de reducción.

2.2.1 Diseño de los brazos para las nuevas condiciones de trabajo

Los brazos de los hornos de reducción son fabricados en la empresa Mecánica del Níquel Gustavo Machín por el método de fundición, debido al alto flujo productivo de obtención de los brazos, ocasionado por sus continuas roturas, se hace necesario un nuevo diseño para garantizar mayor resistencia y durabilidad, disminuyendo costos e importaciones.

El nuevo diseño está basado en el aumento de los espesores de la sección transversal en el cuerpo del brazo, tratando de minimizar la flexión, factor fundamental que provoca las sistemáticas roturas.

En las secciones transversales del brazo se realizaron modificaciones buscando garantizar mayor resistencia, en la sección B-B (anexo 1) se realizó una transformación en el espesor de la pared superior de 30 a 25 mm y de 16 a 20 mm en las paredes laterales y en la vista X (anexo 1) se transformó el espesor de la pared superior de 76 a 110 mm.

En ambas figuras los demás parámetros se mantienen con su valor actual.

2.3 Selección del material

En los procesos de diseño y construcción de objetos técnicos, se elegirá entre varios materiales para el desempeño de una determinada tarea. Para elegir un material debemos considerar cuatro aspectos:

1. Sus propiedades (dureza, densidad, conductividad, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson) y sus cualidades estéticas (color y textura) deben de ser adecuadas para la función que ha de desempeñar.

2. Debemos disponer de los conocimientos técnicos y de las herramientas necesarias para su manipulación.

3. El material debe de estar disponible y a un precio razonable.

4. El impacto medioambiental durante la fabricación uso y desecho; Durante el proceso de diseño debemos considerar como afectará nuestro objeto al medio ambiente, durante la construcción, la utilización y el desecho. El abuso de materiales no reciclables puede acabar con los recursos y convertir nuestro entorno en un vertedero. Es por ello que debemos plantearnos reciclar materiales disponibles para nuestros diseños, siempre que sea posible.

El material seleccionado es el HK 40 por su comportamiento a altas temperaturas, dureza, resistencia a la flexión y a la torsión, además la fabricación de los brazos es de carácter nacional por lo que se ahorra en importaciones.

2.3.1 Análisis químico y determinación de elementos de aleación (Análisis espectral)

La comprobación de la composición química de las muestras del acero HK 40 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 “Cmdte. Gustavo (Machín) Hoed de Beche”, Moa. El análisis se efectuó proporcionando tres chispazos con el electrodo a la probeta para obtener su media y así disminuir el margen de error.

2.4 Análisis tenso - deformacional mediante métodos numéricos

Para el análisis tenso - deformacional por el método analítico se tendrá en cuenta que el brazo está empotrado en un extremo y libre en el otro provocando que se

flecte, siendo la parte empotrada la más rígida y por ende la más propensa al fallo. Para facilitar el análisis se tomará el brazo como una viga rectangular con dos cargas distribuidas, una de forma horizontal provocada por el peso del brazo más el peso de los dientes y otra carga de forma vertical provocada por el arrastre del mineral.

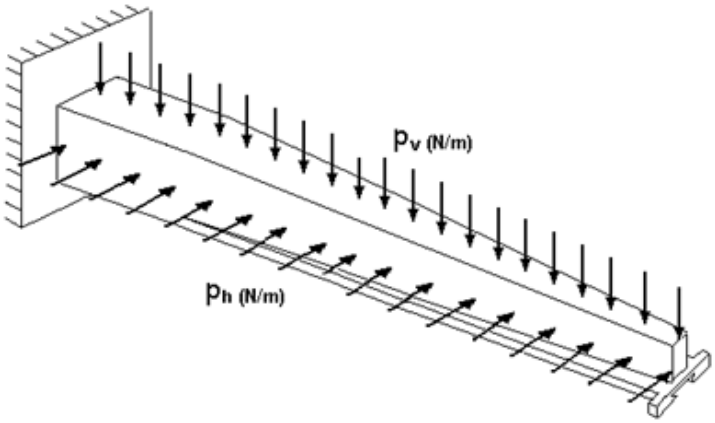


Figura 2.1: Esquema de análisis para el cálculo del brazo como viga con carga uniformemente distribuida.

Propiedades físicas de la aleación

E: Módulo de elasticidad del material a temperatura ambiente,

$E = 20{,}1 \cdot 10^4$; (MPa).

υ: Coeficiente de Poisson, $\upsilon = 0{,}23$

ρ : 7800; (Kg/m^3)

2.4.1 Cálculo del volumen del brazo

Para la obtención de las condiciones de resistencia por el MEF y por el método analítico es necesario conocer el peso del brazo como una sola pieza sin tener en cuenta el peso de los dientes.

Se obtendrá el peso mediante el cálculo de los volúmenes por secciones.

La primera sección tiene base cilíndrica y opta un cuerpo de forma de cono truncado. Analizando sus secciones interiores planteamos:

El $\Delta ABC \sim \Delta CDE$ por semejanza de triángulos.

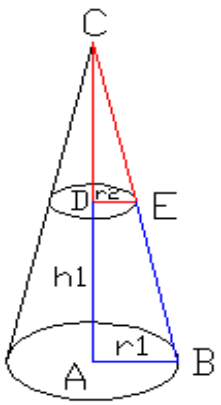


Figura 2.2: Esquema del cono truncado para el cálculo del volumen

$$Vct = \frac{\pi}{3}(r_1 + r_2)h_1 \ ;(\text{mm}^3) \qquad (2.1)$$

Donde:

Vct : Volumen del cono truncado.

r_1: Radio de base mayor; (mm).

r_2 : Radio de la base menor; (mm).

h_1: Altura del cono truncado; (mm).

La segunda sección tiene base rectangular y opta un cuerpo de forma de pirámide truncada. Analizando sus secciones interiores tenemos que:

Siendo ΔABC ~ ΔCDE

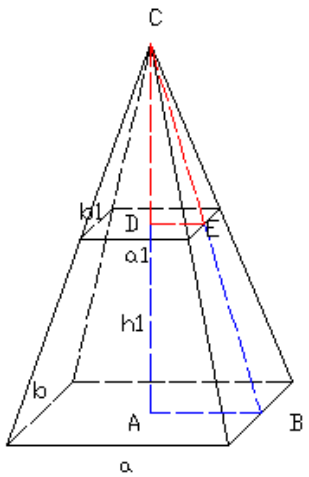


Figura 2.3: Esquema de pirámide truncada para el cálculo del volumen

$$Vpt = \frac{1}{3} h_1 \left[a_1 b_1 + \frac{a_1}{a - a_1} \left(ab - a_1 b_1 \right) \right]; \text{ (mm}^3\text{)} \quad (2.2)$$

Donde:

Vpt : Volumen de la pirámide truncada, (mm^3).

h_1 : Altura de la pirámide truncada; (mm).

a_1 : Largo de la base menor; (mm).

b_1 : Ancho de la base menor; (mm).

a : Largo de la base mayor; (mm).

b : Ancho de la base mayor; (mm).

La tercera sección debido a su complejidad será seccionada para su mayor comprensión.

$$V_{To} = V_r - V_t + V_{pp} \text{ (mm}^3\text{)} \quad (2.3)$$

2.4.2 Cálculo de la masa y el peso

Para el cálculo de los momentos flectores es necesario conocer el peso del brazo como pieza única, formando una carga distribuida en toda su longitud. Para la obtención de este peso se calcula la masa conociendo la densidad, que forma parte de las propiedades físicas del material.

$$Mb = Vtp * \rho \text{ ;(kg)} \quad (2.4)$$

Donde:

Vtp : Volumen total de la pieza; (mm^3).

$$Pb = m * g \text{ ; (N)} \quad (2.5)$$

Pb : Peso del brazo como una sola pieza; (N).

m : Masa; (kg).

g : Aceleración de la gravedad; (m/s^2).

2.4.3 Cálculo del área de la sección transversal

Como el brazo constituye un cuerpo anular el área de la sección transversal se puede determinar por la siguiente ecuación:

$$F_{SECC.TRANS} = F_{SECC1} - F_{SECC2}\text{; (mm}^2\text{)} \qquad (2.6)$$

2.4.4 Momento torsor que actúa sobre los brazos

EL momento torsor es provocado si en la sección o secciones transversales de una barra surgen momentos torsores, es decir, momentos que se encuentran en el plano de la sección. Generalmente los momentos interiores son consecuencias de momentos exteriores (Stiopin, 1985).

$$M_T = P * l\text{; (N*mm)} \qquad (2.7)$$

P_{MAT} : Peso del material; (N).

$l_{DIENTE-BRAZO}$: Longitud del centro del diente al centro del brazo

2.4.5 Comprobación de la resistencia a la flexión

Según Stiopin (1985) para garantizar la resistencia de una viga, es necesario que durante la flexión, las tensiones máximas de tracción y compresión en la sección peligrosa, es decir, en la sección donde M_{flec} tiene el valor máximo, no rebasen las correspondientes tensiones admisibles.

Los cálculos de resistencia se realizarán en la sección más pequeña del brazo, figura 2 (anexo 1).

2.4.5.1 Cálculo de la carga admisible

La curvatura del eje de la viga en la flexión es proporcional al momento flector e inversamente proporcional a la rigidez de la sección a la flexión, por lo que la tensión máxima se obtendrá según (Stiopin, 1985) por la siguiente ecuación.

$$\sigma_{máx} = \frac{M_{Fmáx}}{Wx} \leq [\sigma]\text{; (N/mm}^2\text{)} \qquad (2.8)$$

$M_{f\,máx}$: Momento flector máximo; (Nm).

Wx: Módulo de inercia de la sección; (mm^4).

Los momentos flectores en los planos vertical y horizontal serán obtenidos por el método tradicional de resistencia.

Partiendo de la ecuación (2.8) obtendremos la carga admisible que puede soportar el brazo.

Según Feodosiev, (1985) la tensión admisible para valorar la resistencia mecánica se puede expresar de la siguiente forma:

$$[\sigma] = \frac{\sigma r}{[n]}; \text{ (N/mm}^2\text{)} \qquad (2.9)$$

σr : Tensión límite de rotura; (N/mm^2).

$[n]$: Coeficiente de seguridad normativo.

$$[n] = S1 * S2 * K1 \qquad (2.10)$$

S1: Coeficiente que tiene en cuenta la fiabilidad del material (homogeneidad de las propiedades mecánicas, presencia de los defectos interiores).

S2: Coeficiente que tiene en cuenta el grado de importancia de la pieza (condición de servicio).

K1: Coeficiente que tiene en cuenta la exactitud del cálculo.

$$[P] = \frac{4[\sigma]W}{L}; \text{ (N)} \qquad (2.11)$$

$[\sigma]$: Tensión admisible; (N/mm^2).

W: Módulo de inercia de la sección; (mm^4).

2.4.5.2 Deflexión máxima

Según Craig (2002), para una viga isostática empotrada en un extremo la deflexión máxima o flecha provocada en el extremo libre se obtendrá por la siguiente ecuación.

$$ymáx = \frac{PL^4}{8EI}; \text{ (mm)} \qquad (2.12)$$

P : Carga distribuida en el plano vertical y/o plano horizontal; (N).

L : Longitud de la sección; (mm).

E : Módulo de elasticidad; (MPa).

I : Momento de inercia; (mm^4).

2.4.6 Análisis cinemático y dinámico de los hornos de reducción

Para el análisis cinemático y dinámico se debe tener en cuenta la distribución de los elementos mecánicos que dan origen al movimiento de los brazos. Este sistema está compuesto por los siguientes elementos: Motor eléctrico, sistema de transmisión correa-polea, reductor y árbol central, en el cual van colocados los brazos.

Rechetov (1985) plantea que la relación de transmisión total de un accionamiento se puede obtener por la ecuación:

$$i_T = \frac{n_{mot}}{n_{máq}} \tag{2.13}$$

Donde:

i_T : Relación de transmisión total del accionamiento.

n_{mot} : Número de revoluciones del motor, (rev/min).

$n_{máq}$: Número de revoluciones de la máquina (eje con brazos), (rev/min).

2.4.6.1 Relación de transmisión del reductor

El cálculo de la relación de transmisión del reductor se realizará mediante un despeje de la relación de transmisión total, teniendo en cuenta la transmisión polea – correa y el engranaje cónico, partiendo de la ecuación general:

$$i_T = i_{P-C} * i_R * i_C \tag{2.14}$$

$$i_R = \frac{i_T}{i_{P-C} * i_C} \tag{2.15}$$

Donde:

i_T : Relación de transmisión total.

i_{P-C} : Relación de transmisión polea – correa.

i_C : Relación de transmisión del engranaje cónico.

2.4.6.2 Relación de transmisión Polea – Correa

La transmisión por correas consta de una polea conductora y otra conducida y de una correa montada sobre las poleas con tensión, correa que transmite la fuerza

circunferencial por rozamiento. Son posibles las transmisiones con dos o tres poleas conducidas.

Las correas trapezoidales son las de mayor uso en la maquinaria industrial en general, debido a su capacidad de tracción elevada. En una transmisión es puede emplear varias correas trapezoidales, para variar su capacidad de carga y evitar grandes tensiones de flexión en una correa que tendría que tener una sección elevada, (Rodríguez Isnel, 2008).

$$i_{P-C} = \frac{D_2}{D_1(1-S)} \tag{2.16}$$

Donde:

D_2: Diámetro máximo, (mm).

D_1: Diámetro mínimo, (mm).

S : Coeficiente de deslizamiento.

El rendimiento de la transmisión correa – polea se encuentra estandarizada.

$$\eta_{P-C} = (0{,}85...0{,}92)$$

2.4.6.3 Relación de transmisión del engranaje cónico

Las ruedas cónicas se emplean en los engranajes entre árboles cuyos ejes se hallan dispuestos en ángulo. Lo más extendidos son los engranajes con los ejes que se cortan en ángulo de 90°. Los engranajes cónicos con un ángulo entre ejes no igual a 90° se emplean muy poco, debido a la complejidad de su forma y tecnología de fabricación de las piezas armazones portantes de estos engranajes, aunque, para la fabricación de las mismas ruedas el ángulo entre ejes del engranaje no tiene importancia.

A pesar que las ruedas cónicas son más complejas que las cilíndricas, en la fabricación y en el montaje, ellas tienen una aplicación bastante amplia en la mecánica en general.

Las ruedas cónicas se ejecutan con dientes rectos (los más difundido), oblicuos, hipoides y curvilíneos, (Rodríguez Isnel, 2008).

$$i_C = \frac{Z_2}{Z_1} \tag{2.17}$$

Donde:

i_C : Relación de transmisión del engranaje cónico.

Z_2 : Número de dientes de la rueda.

Z_1 : Número de dientes del piñón.

El rendimiento del engranaje cónico está estandarizado.

$$\eta_C = (0{,}98...0{,}96)$$

2.4.6.4 Rendimiento total

El rendimiento total del accionamiento se muestra en la siguiente ecuación:

$$\eta_T = \eta_{P-C} * \eta_R * \eta_C \tag{2.18}$$

2.4.6.5 Cálculo de la potencia del eje central (máquina)

El cálculo de la potencia del eje estará definido por:

$$N_{EJE} = \eta_T * N_{Mot} \tag{2.19}$$

Donde:

N_{EJE} : Potencia del eje, (kW).

η_T : Rendimiento total.

N_{Mot} : Potencia del motor, (kW).

2.4.7 Cálculo de la fuerza de fricción que actúa sobre los brazos

Al producirse el barrido de mineral se genera una fuerza de fricción entre los dientes y el mineral, provocando desgaste y el momento torsor antes citado, por lo que se hace necesario la obtención de su valor, para un mejor estudio.

$$F_r = F - I * \frac{V^2}{R^2}; \ (N) \tag{2.20}$$

F: Fuerza con que se genera el movimiento del brazo; (N)

I: Momento de inercia; (mm^4).

V: Velocidad del brazo; (m/s).

R: Longitud del brazo; (mm).

Fuerza con que se genera el movimiento del brazo:

$$F = \frac{M_T}{R}; \text{ (N)} \tag{2.21}$$

Momento torsor:

$$M_T = \frac{N}{W}; \text{(Nmm)} \tag{2.22}$$

N: Potencia del brazo; (N).

W: Frecuencia de rotación; (rad/s).

El momento torsor que actúa sobre los brazos debe ser menor o igual que el momento torsor provocado por el accionamiento.

$$M_T = P * l \leq M_T = \frac{N}{W}$$

Tensión máxima a torsión:

$$\tau = \frac{M_{Tmáx}}{W_p} \leq [\sigma]; \left(\frac{N}{mm^2}\right) \tag{2.23}$$

2.5 Modelación y simulación por el Método de Elementos Finitos

La simulación del comportamiento del brazo durante su explotación se realizó por medio del método de los elementos finitos (MEF) para verificar la conducta de los materiales sometido a las elevadas cargas. Dichos métodos garantizan la reducción de los costos y la cantidad de ensayos a realizar con una precisión aceptable. Las corridas se hicieron con ayuda del software ANSYS (V.11.0) coincidiendo con (Friedel, 2004; García, 2007 y Rodríguez *et al.*, 2007).

2.5.1 Simulación por el Método de Elementos Finitos

Durante el funcionamiento de los brazos en el proceso de barrido existe un proceso térmico influenciado por el medio en el que se desempeña, donde se tiene en cuenta

los problemas de transferencia de calor. Para la simulación se empleará el software ANSYS V.11.0.

En dependencia del coeficiente de transferencia de calor y la temperatura ambiente. Las variables a tener en cuenta en la simulación del proceso de solidificación son:

1. Temperatura de trabajo (645 - 890ºC).
2. Conductividad térmica del HK – 40.
3. Coeficiente de expansión térmica.
4. Coeficiente de Poisson.
5. Módulo de dilatación.
6. Módulo de elasticidad longitudinal.
7. Módulo de elasticidad transversal.

2.5.1.1 Condiciones y parámetros establecidos

Se elaboró un modelo geométrico equivalente al objeto investigado, el que se discretizó con elementos tetraédricos de nodos intermedios del tipo “SOLID93”. Se establecieron, además, las condiciones de frontera siguientes: se consideró que el material es homogéneo e isotrópico. El módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson varían en función de la temperatura.

2.5.1.2 Algoritmo para la simulación (ANSYS versión 11.0)

El algoritmo desarrollado por etapas para el análisis que desarrolla el paquete ANSYS fue:

Primera etapa: Modelado de tubos de pequeñas dimensiones sometidos a temperatura de fusión.

Segunda etapa: Modelado de tubos inoxidables empleados en la industria minero metalúrgica.

Tercera etapa: Generación del mallado y condensación.

Los métodos informáticos tanto el hardware como el software, ha permitido afrontar la solución de complejos problemas físico-matemáticos cuya solución analítica resultaría prácticamente imposible.

El Método de los Elementos Finitos (MEF) está muy generalizado y constituye una potente herramienta de cálculo capaz de resolver cualquier problema formulable de la matemática, la física y la mecánica; permitiendo simular y realizar una gran cantidad de análisis en componentes y estructuras complejos, difícilmente calculables por los métodos analíticos tradicionales.

Con la simulación mediante MEF se intenta reproducir la realidad a partir de la resolución numérica de las ecuaciones matemáticas que describen el fenómeno estudiado con el uso de un ordenador. Por lo tanto, se puede asumir que la simulación es tan exacta como tantas sean las ecuaciones de partida y la capacidad de los ordenadores para resolverlas, lo cual fija límites a su utilización (Ingham y Moreland, 1993).

Velázquez (2002) plantea que como principio inicial para el análisis, los brazos se consideran como un sistema discreto. Teniendo en cuenta sus características de diseño (las dimensiones de la sección varían de manera suave, continua y proporcionalmente en el sentido longitudinal), los mismos se pueden considerar como vigas empotradas de igual resistencia a la flexión.

El cálculo se realiza empleando el Método de los Elementos Finitos (MEF) con ayuda del paquete de software ANSYS (V.11.0).

Los cálculos se realizan para la condición del máximo de carga, considerando como productividad del horno la establecida según el diseño original: 17 ton/h. Teniendo en cuenta que los esfuerzos trasmitidos por los brazos ocurren con velocidades de rotación relativamente pequeñas (1.4 –1.5 rev/min).

En el caso específico del análisis tenso-deformacional de elementos sometidos a la acción de cargas estáticas, el método permite la determinación de los componentes de los nodos por el efecto de una solicitación estática y, en una segunda fase, la determinación del estado deformacional en ciertos puntos característicos. Este tipo de análisis permite acotar la deformación del objeto de estudio y localizar zonas altamente solicitadas o zonas de baja solicitación.

2.6 Costos de fabricación

Para el cálculo de costos de los brazos, se tuvo en cuenta los procesos de por los cuales transita, como son: fundición y maquinado.

Los cálculos de costos se obtendrán conociendo las operaciones que se realizan, tarifa de las operaciones y tiempo de trabajo, así como el consumo de los equipos y materia prima utilizada en el taller.

Para determinar el costo de la energía eléctrica se tuvo en cuenta la tarifa de pago del MINBAS a la UNE, ésta pertenece al grupo A1, que es el pago en CUC, con una demanda contratada de 1 500 kW para obtener este servicio de pago de $3,00.

Para los diferentes horarios (pico, normal y madrugada) se establece una tarifa de pago, siendo el precio de 0,04 $/kWh la tarifa eléctrica establecida en horario normal.

2.6.1 Cálculo de costos

$$C_{MOperario} = Tarifa_{Operario} * Total_{Horas}; \text{ (\$)} \quad (2.24)$$

$C_{MOperario}$: Costo de maquinado (para operarios); ($)

$Tarifa_{Operario}$: Tarifa de pago al obrero; ($/h)

$Total_{Horas}$: Total de horas de maquinado de la pieza; (h)

$$C_{MMáquina} = Tarifa_{Máquina} * Consumo_{Horas}; \text{ (\$)} \quad (2.25)$$

$C_{MMáquina}$: Costo de maquinado (para máquinas); ($)

$Tarifa_{Máquina}$: Tarifa para el horario normal ($)

$Consumo_{Horas}$: Consumo de kW por hora; (kW/h)

$$C_{TotaldeMaquinado} = C_{MOperario} + C_{MMáquina}; \text{ (\$)} \quad (2.26)$$

$C_{TotaldeMaquinado}$: Costo total de maquinado; ($)

2.7 Conclusiones del capítulo

1. Se expuso la metodología de cálculo de resistencia del brazo, las propiedades físicas del material y las condiciones de trabajo.

2. Se estableció el método de elementos finitos así como sus etapas a seguir para la simulación.

3. Se definió la metodología para la obtención del costo de fabricación de la pieza.

CAPÍTULO III

CAPÍTULO III: VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1 Introducción

El buen diseño constituye una parte importante de la economía actual, disminuyendo en importaciones y costos de fabricación. Dado que los brazos son un elemento imprescindible en la producción de los Hornos de Reducción, es necesario conocer su estructura interna y las propiedades del material, de tal modo que se pueda elegir el más adecuado para su fabricación y a su vez un mejor diseño.

Objetivo del capítulo

Valorar los resultados de la investigación teniendo en cuenta los criterios técnicos, económicos y medioambientales.

3.2 Disponibilidad de los brazos

Según las estadísticas, en los años comprendidos entre 1994 y 1999 se sustituyeron un total de 7 557 brazos (1 511 brazos/año como promedio) y las paradas provocadas por estos cambios representó el 92 % del total de paros por conceptos de averías no planificados en los ciclos de reparación y mantenimiento, esto es reafirmado por (Velásquez Alberto, 2002).

Entre los años 2008 y 2012 se produjeron 6842 roturas de brazos con un promedio de 1368 brazos/año provocando el 91.31 % de paradas por concepto de averías.

3.3 Diseño de los nuevos brazos

Para el cálculo del momento flector es necesario conocer las cargas uniformemente distribuidas de forma horizontal y vertical.

Las cargas horizontales están compuestas por la suma del peso del brazo como pieza única más el peso de los dientes, se tomó el máximo de dientes que puede soportar el brazo (14), con una masa aproximada de 2 kg por cada uno. Debido a la complejidad de la pieza en cuestión se realizó el cálculo del volumen por secciones arrojando un valor total de $40{,}46067157 * 10^6$ mm^3 para obtener la masa de 319,64 kg. Por lo que el peso del brazo como pieza única es de 3135,6684 N.

3.3.1 Análisis químico

Mediante el análisis químico realizado en el laboratorio del taller de fundición en la empresa mecánica del níquel Cmdte Gustavo Machín Hoed de Beche se obtuvieron los siguientes resultados, siendo la composición química real del acero HK 40.

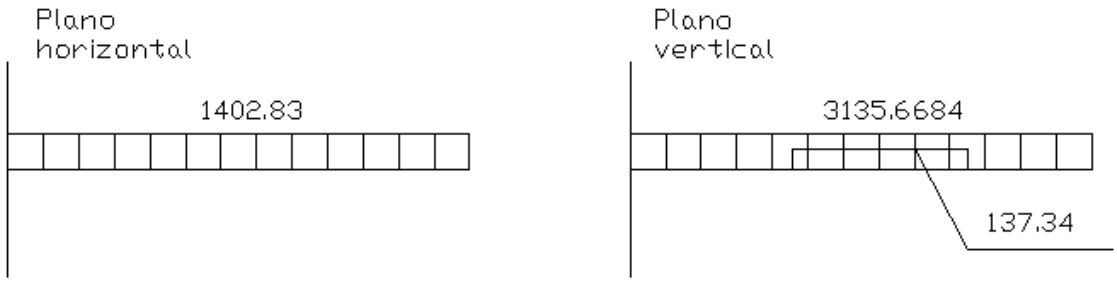
Tabla 3.1. Composición química del acero HK 40

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
Min	0,30	0,50	0,75			23,00		18,00	
X	0,48	0,60	1,01	0,022	0,023	25,20	0,08	21,34	0,0209
Max	0,50	1,00	1,50			27,00		22,00	

	Co	Cu	Fe
X	0,12	0,10	50,96

3.4 Análisis de la resistencia

En la figura 3.1 aparecen los gráficos de los esfuerzos que actúan sobre un brazo cargado, mientras que en la Tabla 3.2 se muestran los resultados de los cálculos de resistencia obtenidos por el método tradicional de resistencia.



a) Caga distribuida en el plano horizontal b) Carga distribuida en el plano vertical

Figura 3.1 Esquema del brazo analizado como viga en cantilever carga uniformemente distribuida.

Los valores máximos de esfuerzos se localizan en la zona del empotramiento, correspondiéndose la misma con la sección más peligrosa del brazo. Los momentos flectores originados por la resistencia de la carga durante el movimiento de barrido (plano horizontal) y el peso del elemento cargado con los dientes (plano vertical) originan un momento flector equivalente igual a $1{,}229*10^4$ Nm; el que a su vez tiene asociado una tensión de flexión de 128.285 MPa.

En la tabla 3.2 se muestra un resumen de los principales parámetros mecánicos evaluados en el brazo como viga en cantilever (ver anexo 2).

Tabla 3.2. Resultados de los cálculos de la viga.

Parámetros	Valores
Carga distribuida en el plano horizontal (N)	1402,83
Carga distribuida en el plano vertical (N)	3273,0084
Momento flector provocado por la carga distribuida en el plano horizontal (Nm)	4918,254
Momento flector provocado por la carga distribuida en el plano vertical (Nm)	11267,642
Momento equivalente (Nm)	$1,229*10^4$
Fuerza cortante provocada por la carga distribuida en el plano horizontal (N)	3714,69
Fuerza cortante provocada por la carga distribuida en el plano vertical (N)	8518,598
Fuerza cortante equivalente	9293,300
Tensión normal (MPa)	28,285
Deflexión Máxima en el plano vertical; (mm)	45,13
Deflexión Máxima en el plano horizontal; (mm)	$1.322*10^{-4}$
Deflexión admisible; (mm)	6.062*10-3
Carga admisible; (N/m)	$6,433*10^4$
Tensión admisible; (MPa)	362,319
Coeficiente de seguridad normal	2,82
Coeficiente de seguridad admisible normativo	1,38

Valoración de la resistencia mecánica

Para la valoración de la resistencia se tuvo en cuenta un coeficiente de seguridad admisible normativo que se selecciona según parámetros de construcción, para el cálculo de la tensión admisible y el posterior cálculo de la carga admisible este coeficiente proyectó un valor de 1,38.

La tensión admisible con un valor de 362,319 MPa de la ecuación (2.9), se comparó con la tensión normal con un valor de 128,285 MPa, garantizando la resistencia mecánica del brazo. La carga admisible normal con valor igual a $6,433*10^4$ N/m es superior a la carga normal de 1402,83 N/m y 3273,0084 N/m (plano horizontal y vertical respectivamente), en el caso de la deflexión se cumple de igual manera, (tabla 3.2).

3.5 Análisis cinemático y dinámico

En la tabla 3.3 se muestran los resultados del accionamiento, fuerza de fricción provocada por el arrastre de mineral sobre los brazos y la tensión normal a torsión.

Tabla 3.3. Resultados del accionamiento.

Parámetros	Valores
Relación de transmisión total	967,033
Relación de transmisión Polea – Correa	2,296
Relación de transmisión del acoplamiento cónico	5
Relación de transmisión del reductor	84,239
Rendimiento del reductor	0,75
Rendimiento total	0.612
Potencia del eje, (W)	1,346E^4
Momento torsor que actúa sobre los brazos, (Nmm)	1,452E^5
Momento torsor provocado por el accionamiento, (Nmm)	141E^6
Fuerza con que se genera el movimiento del brazo, (N)	2,677E^5
Fuerza que actúa sobre los brazos, (N)	-1,848E^15
Tensión normal a torsión, (N/mm^2)	2733

El momento torsor provocado por el accionamiento tiene que ser mayor que el momento torsor que actúa sobre los brazos, para que exista un buen funcionamiento del accionamiento mecánico, esto se cumple puesto que el Mtacc=141E^6 ≥ Mtb=1,452E^5. La potencia de la máquina debe ser menor que la potencia del motor para que este pueda vencer las cargas aplicadas al brazo y poder realizar el mecanismo de barrido, Nmot=22 kW ≥ Nmáq=13,460 kW.

3.6 Resultados de la aplicación del MEF al diseño obtenido

La simulación del brazo perteneciente al mecanismo de barrido de los hornos de reducción de La Planta Hornos de Reducción de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara se realizó en el programa ANSYS (V.11.0) por el cuál se obtuvo los resultados de desplazamientos y tensiones normales provocados por las cargas horizontales y verticales y la temperatura a la cual están sometidos dentro del horno.

Se introdujeron a su vez el módulo de elasticidad, coeficiente de poisson y densidad como propiedades físicas del material.

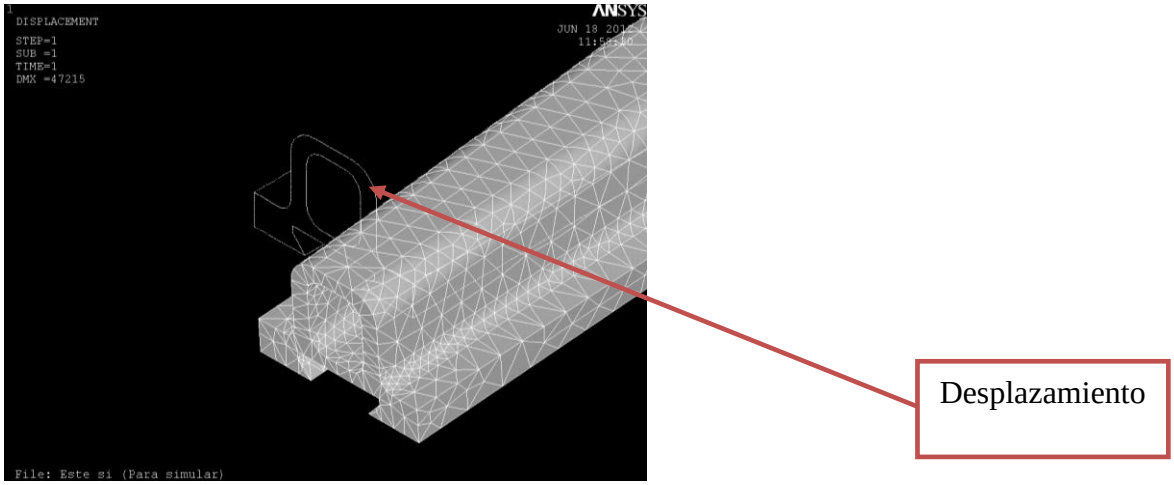


Figura: 3.1 Desplazamiento en el eje x

Los desplazamientos máximos de 47,21mm no dificultan el trabajo de los brazos en su proceso de barrido de mineral, estos se registran en la punta del brazo, donde el espesor es mínimo. Este desplazamiento es generado por las cargas horizontales y verticales con valores de 1402,83 N y 3273,0084 N respectivamente.

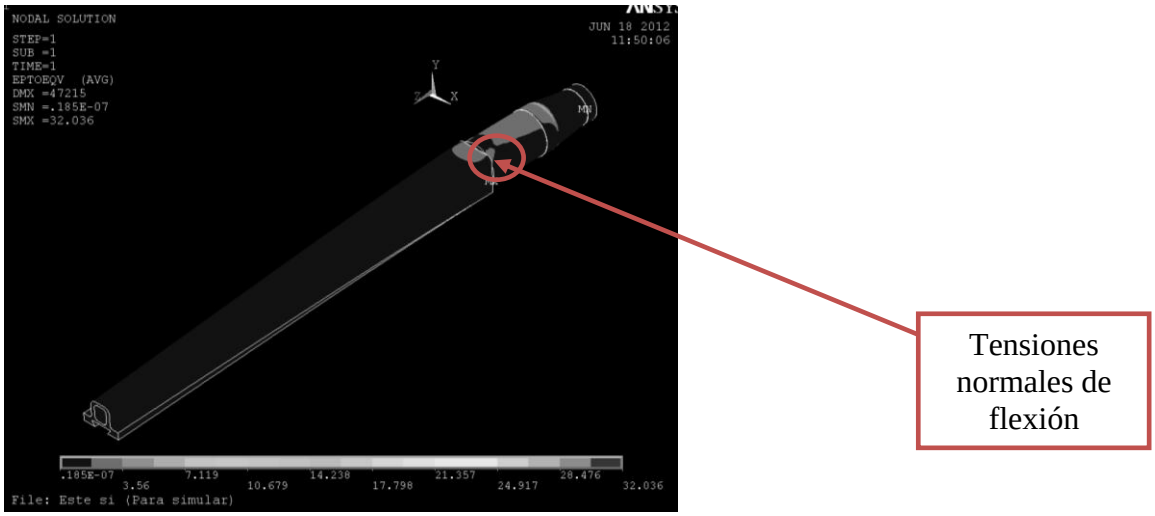


Figura: 3.2 Tensiones de Von Mises

Las tensiones máximas con valores de 32 N/mm^2 registradas por el programa de cómputo se encuentran muy por debajo de las tensiones admisibles del material (500 N/mm^2) para la mayor temperatura de 890 ^{0}C, comprobándose la resistencia del elemento a las condiciones de cargas y temperaturas máximas a la que está sometido. Los valores de tensiones máximas se encuentran donde la cola de milano se une a la zona empotrada, por ser esta la sección más rígida, y existir un cambio brusco de sección con ángulos agudos. En los lugares donde la configuración del contorno de la sección longitudinal varía bruscamente, la distribución de las

tensiones cambia súbitamente y surge la concentración de tensiones. Un cambio brusco en la sección implica un cambio brusco en las fuerzas internas, en la distribución de las tensiones y en el estado tensional que puede cambiar de lineal a plano o triaxial.

Con el análisis tenso – deformacional realizado se pudo comprobar la resistencia del elemento para las condiciones de cargas según el diseño. Pero factores casuales como la presencia de objetos extraños (Libros de Registros de Datas y Averías de la Planta de Hornos de Reducción) como ladrillos refractarios pertenecientes al revestimiento interior del horno, fragmentos de clinker y dientes partidos pueden provocar roturas por sobrecarga (Velásquez, 2002).

3.7 Costos de fabricación

Debido a las continuas paradas por concepto de roturas de los brazos se incrementa el flujo de fabricación de los mismos por lo que aumenta proporcionalmente su costo en concepto de consumo de material (materias primas), energía eléctrica e importaciones siendo un impacto económico para nuestro país.

En las siguientes tablas se muestran los costos de fabricación del taller 08 perteneciente a fundición y 07 perteneciente a maquinado.

3.7.1 Costos de maquinado

Calificación	Tarifa ($/h)	Total horas	Importe ($)
Tornero	2,64	1	2,64
Taladrador	2,54	0,33	0,8382
Fresador	2,64	0,025	0,066
Soldador	3,2	0,083	0,2656
Total			3,8098

Máquinas	Tarifa ($/kWh)	Consumo por hora(kW/h)	Importe ($)
Torno 165 (Ruso)	0,04	13	0,52
Taladro radial 2M55	0,04	10	0,4
Máquina de soldar Miller	0,04	8	0,32

Fresadora 6Г610	0,04	10	0,4
Total			1,64

El costo total de maquinado es de $5,4498.

3.7.2 Costo de Fundición

Los costos de gastos generales se encuentran en los anexos (Anexo 2)

Materiales				
Producto	Precio Total (CUP)	Precio CUC	Importe Total (CUP)	Importe CUC
Granalla	1600,959	1600,959	10,406	10,406
Disco abrasivo P/Desba	1,93	1,93	9,68	9,68
Desmoldeante, Base de aluminio	178,228	178,228	0,71	0,71
Electrodo de carbón (9,5)	0,34	0,31	17,33	15,84
Lingote aluminio	3653,447	3653,447	11,25	11,25
Alambre de acero para Muelle (6,0)	1130,421	1130,421	6,78	6,78
Miel final	81,491	0	2,037	0
Silicato metalúrgico	403,450	329,340	16,13	13,17
Muela plana	118,095	118,095	23,61	23,61
Sinter de níquel	22427,931	18007,67	5279,08	4238,64
Carbón antracita	274,40	274,40	1,64	1,64
Palanquilla AC	549,81	378,17	211,46	145,45
Ferro cromo	7720,39	7442,16	3349,49	3228,78
Silicio metal	2026,07	2026,07	17,14	17,14
Alcohol clase A	0,57	0,36	8,63	5,53
Bentonita nitrificada	377,03	314,34	49,01	40,86

Ferromanganeso	7115,34	6835,28	65,67	63,08
Arena sílice	133,37	49,75	0,20	0,07

Fuerza de trabajo			
Operación	Tiempo	Tarifa	Importe
Preparación de carga	3,18	2,99	9,50
Preparación de carga	3,17	2,50	7.925
Preparación de carga	12,84	2,47	31,7148
Preparación de carga	9,54	2,36	22,5144
Reverbería	12,71	2,64	33,554
Elaboración de molde	6,36	3,26	20,7336
Elaboración de molde	28,61	2,71	77,5331
Elaboración de molde	28,61	2,64	75,5304
Elaboración de macho	15,89	2,50	39,725
Elaboración de macho	15,89	2,50	31,3937
Elaboración de macho	31,79	2,36	75,0244
Fusión	6,36	3,26	20,7336
Ensamble	34,96	2,71	94,7416
Vertido	15,89	2,64	41,9496
Vertido	6,36	2,47	15,7092
Rebabado	6,29	2,71	17,0459
Rebabado	9,54	2,47	23,5638
Corte sist. alim	15,89	2,50	39,7250
Limp/Terminación	19.07	2,36	45,0052

El costo total de fundición es de 38705,3 CUC equivalente a 61678 CUP

El costo de fabricación total de la pieza es de 1992,76 CUP equivalente a 3146,15 CUC, siendo el total de $5138,91.

3.8 Impacto ambiental

El proceso de modernización y el incremento de la eficiencia metalúrgica de la fábrica repercuten favorablemente en la situación medioambiental. En esta planta la contaminación es provocada por salideros de mineral, en romanas, alimentadores, sinfines de polvo etc. El derrame de mineral cae a los pisos inferiores y este es eliminado mediante el soplado con aire (provocando contaminación en el área y en el exterior de la planta). El derrame y salideros de mineral en la planta por los sellos de los transportadores, cae a la planta baja, este mineral se somete a la limpieza con agua y es trasladado por canales hacia tres pozos (uno para cada ocho hornos), mediante bombas la pulpa se envía hacia la canalización oeste de la fábrica, que lo descarga al río Moa (este residual contiene gran cantidades de sólidos y grasas) sin tratamiento previo. Otro foco de contaminación es provocado por los salideros de grasas (escotillas, mirillas, cámaras, sellos de los transportadores), estos gases contienen CO_2, H_2, CO y son expulsados a la atmósfera y al área de trabajo. Los gases de la planta son ventilados hacia secaderos y parte oeste de la planta, cuando cambia el sentido del aire estos gases afectan la fábrica en general y áreas aledañas. En la planta la contaminación del aire por el polvo reduce la visibilidad resultante de absorción y dispersión de la luz por los materiales líquidos y sólidos arrastrados por el aire. La visibilidad se altera por las partículas que se forman en la atmósfera, por las reacciones en las partes gaseosas.

3.8.1 Impactos Ambientales generados por la planta Hornos de Reducción

1. Afectaciones a la estética laboral durante el montaje y desmontaje de los equipos y componentes de la planta.

2. Altos ruidos producto a los equipos dinámicos de la operación.

3. Elevadas temperaturas en las zonas de trabajo.

4. Generación de polvo y gases fugitivos calientes por sistema de alimentación y descarga de los hornos.

5. Generación de polvo y gases fugitivos calientes por sistema de alimentación y descarga de los alimentadores.

6. Arrastre de mineral crudo a las canalizaciones.

3.9 Conclusiones del capítulo

1. Se verificó la resistencia de los brazos mecánicos del mecanismo de barrido de los Hornos de Reducción de la Planta de Hornos de Reducción en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, comprobándose que los mismos cumplen con la condición de resistencia e incluso, poseen coeficientes de seguridad por encima de los normales.

2. El análisis tenso - deformacional de los brazos mecánicos permitió identificar los factores de mayor influencia en la rotura del mecanismo de barrido de los Hornos de Reducción de la Planta de Hornos de Reducción en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

3. El costo de fabricación total de la pieza es de 1992,76 CUP equivalente a 3146,15 CUC, siendo el total de $5138,91.

CONCLUSIÓNES GENERALES

1. Se comprobó la resistencia del brazo mecánico del sistema de barrido de los hornos de reducción de la Planta Hornos de Reducción en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, demostrándose que los mismos cumplen con la condición de resistencia y poseen coeficientes de seguridad por encima de los normales.

2. El análisis tenso - deformacional de los brazos permitió demostrar al igual que el analítico que los brazos no fallan debido a las cargas que actúan sobre el mismo, pero que si existen puntos frágiles cerca del empotramiento.

3. El costo económico en que incurre la empresa por concepto de compra de brazos mecánicos asciende a la cifra de 3146,15 CUC.

RECOMENDACIONES

1. Para disminuir la concentración de tensiones se recomienda eliminar los cambios bruscos del contorno de la sección longitudinal, sustituyéndolos por curvas suaves.

2. Que se continúe el estudio de los brazos de barrido de los hornos de reducción respecto a su análisis estructural y a sus fallas.

3. Continuar e intensificar el monitoreo a los brazos fundidos en la Empresa Mecánica del Níquel para que los mismos cumplan con las composiciones químicas y dimensiones estándares de diseño.

4. Realizar el análisis de resistencia dinámica a los brazos de barridos de los hornos de reducción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIBLIOGRAFÍA

1. ASTM HANDBOOK. Failure Analysis and Prevention, Ohio: ASM International, 1996.

2. BEDDOES, J y J. Gordon: Introduction to Stainless Steels, Hitchin: ASM International, 1999.

3. BOYLE, J. y J. Spence: Stress analysi s for creep. Londres: Butteerwoths, 1989.

4. Craig: Mecánica Vectorial. Primera edición en español. 2002.

5. DOMÍNGUEZ, A.: Influencia del perfil de temperaturas en la formación de clínker y rotura de brazos. Informe Técnico. Empresa Ernesto Che Guevara, 1995.

6. EVERHORT, John L.: Engineering properties of nickel and níkel alloys, P. E. Plenum press New York-London, 1971.

7. FEODOSIEV, V. I.: Resistencia de materiales. Tomo I. Instituto del libro La Habana. 1969.

8. FERNÁNDEZ, G.: Resistencia de materiales. Tomo I y II.

9. GIRÓN, A; A. Velázquez y M. Mariño: Causas de roturas de la aleación austenítica 40X24H12C en Hornos de Reducción de Mineral Laterítico. En: Memorias de la Conferencia Científica Internacional GEOMIN´97. ISMM, Moa, 1997.

10. GULIAEV, A. Metalografía. Tomo I. Moscú. Editorial Mir. 1983.

11. GULIAEV, A. Metalografía. Tomo II. Moscú. Editorial Mir. 1983.

12. Hall et al., 1986; Hamano (1988); Li (1989); Shah et al., 1990; Brown (1994) y Mannan et al., 1996

13. LAI, G. Y.: Heat Resistant Materials for Fu rnace Parts, Trays and Fixtures: Heat treating. ASM Handbook, Ohio: ASM International Vol. 1. 1992.

14. LEYVA, D: Verificación de la resistencia mecánicaen los dientes rascadores clave 11 del mecanismo de barrido de los Hornos de Reducción. Tesis presentada en opción al Título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 2010.

15. MARIÑO, M.; VELÁZQUEZ, A.; Papamantellos D.; Chang, A. Cardona: Diseño de una aleación termorresistente base hierro para hornos Herreshoff. Parte I-

Modelación de propiedades mecánicas y simulación del diagrama de fase. En: Revista de Minería y Geología. Vol. 24 (3) 2008.

Métodos de ensayo.

16. NAUMANN, K.: Failure Analysis, Case Histo ries and Methodology, Stuttgart: Riedered-Verlag, 1998.

NC 10-55:86. Metalografía. Microfotografías. Escala de las Imágenes.

NC 10-56:86. Metalografía. Microestructura de metales de aleaciones duras.

17. NORMA INTERNACIONAL:

18. NORMAS CUBANAS:

19. PARDO, A.: Estudio de la cinética de corrosión a altas temperaturas de las superaleaciones I-657 y HK-40 en presencia de la mezcla eutéctica fundida 82 %. K2SO4-18 % V2O5. En: Revista de Metalurgia, Vol. 29 (5) 1993.

20. PECKNER, D. e I. M. Bernstein: Handbook of Stainless Steels. Third Edition. Pittsburgh: McGraw Hill Book Co., 1994.

21. PERO-SANZ, J. A.: Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Madrid: DOSSAT 2000, 1996.

22. POWELL, G. W.; S. E. Mahmoud y K. Mills: Failure Analysis and Prevention, Metals Handbook of ASM, Ohio: ASM Inter national, Vol.11, 1995 Págs.: 380-410

23. PREVOT, S.: Algunas consideraciones sobre la rotura de brazos por formación de clinker en los hornos de reducción. Informe Técnico. Empresa Comandante "Ernesto Ché Guevara", 1994.

24. QIU, C.: Thermodynamic calculation and precipitation of carbides in the Fe-Cr-Ni-C system. En: Steel research. Vol. 64, (12), 1993.

25. SAXENA, A.: Nonlinear Fracture Mechanics for Engineers. Boca Ratón: Editorial CRC Press. 1998.

26. STIOPIN, P. A.: Resistencia de Materiales

27. TORRES, G.: Modelación matemática para predecir el comportamiento del extractable de Ni en los Hornos de Reducción. Tesis presentada en opción al grado científico de Master en Ciencias. Universidad de Oriente, 1999.

28. VAN WERSHOVEN, T.: How to Conduct Failure Analysis, En: Advanced Materials & Processes, Vol. 11, 1999.

29. VELÁZQUEZ, A. y M. MARIÑO: Caracterización preliminar de la rotura de la aleación austenítica 40X24H12C en Hornos de Reducción de Mineral Laterítico. En: Memorias de la Conferencia Científica Internacional MATERIALES´96. ISPJAE, C. Habana, 1996.

30. VELÁZQUEZ, A. y M. MARIÑO: Consideraciones termodinámicas sobre la precipitación de fases secundarias en la aleación HH a elevadas temperaturas. En: Memorias de la Conferencia Científica Internacional GEOMIN´97. ISMM, Moa, 1997.

31. VELÁZQUEZ, A. y M. MARIÑO: Corrosión a altas temperaturas de la aleación austenítica 40X24H12C en atmósfera reductora. En: Memorias del IV Congreso. Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Santiago de Chile. 1999.

32. VELÁZQUEZ, A. y M. MARIÑO: Resistencia a la carburización de los aceros refractarios 0.4%C-24%Cr-12%Ni-1%Si (AISI HH) y HK40. En: Revista Cubana de Química. Vol. XI, No. 2 1999.

33. VELÁZQUEZ, A.: Fragilización de la aleación HH por precipitación de fases sigma. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 2002.

34. VELÁZQUEZ, A.; M. MARIÑO y E. ALFONSO: Comportamiento de las aleaciones termorresistentes AISI HH y HK-40 ante los procesos de carburización y nitruración. En: Revista de Minería y Geología. Vol. 18 (1) 2001.

Anexos

Anexo 2

Costos generales de fundición, incluye los costos de materiales y de mano de obra.

Conceptos de gastos	Total	Total en CUC
Materias Primas y Materiales	10099,87	8852
Materiales	9080,32	7832,45
Combustibles y lubricantes	18,33	18,33
Energía Eléctrica	454,17	454,17
Útiles y Herramientas	460,19	460,19
Agua	86,86	86,86
Sub total (Gastos de elaboración)	3940,47	659,46
Otros gastos directos	558,01	8,42
Depreciación	389,64	0
Arrendamiento de equipos	168,37	8,42
Gastos de fuerza de trabajo	1385,12	287,84
Salarios	723,63	0
Vacaciones	65,78	0
Contribución Seg.Social, Impuesto/ Fuerza de trabajo	307,87	0
Estimulación en divisas	287,84	287,84
Gastos indirectos de producción	1265,20	258,86
Depreciación	25,92	0
Mantenimiento y reparación	1239,28	258,86
Gastos generales y de Administración	375,81	37,06
Combustibles y lubricantes	4,20	4,20

Energía eléctrica	3,24	3,24
Depreciación	13,18	0
Otros	355,19	29,62
Gastos bancarios	356,32	67,28
Costo de producción	14040,34	9511,46
Margen de utilidad S/ Base autorizada	788,09	0
Precio establecido por el MFP	14828,44	0
Componente en pesos convertibles	0	9511,46