



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
“DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE DIPLOMA

EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

Título: Verificación de la resistencia mecánica en los dientes rascadores clave 11 del mecanismo de barrido de los Hornos de Reducción.

Autor: Darlin Leyva Matos

Tutor: Dr. Alberto Velázquez del Rosario

“AÑO 52 DE LA REVOLUCIÓN”

MOA 2010



Declaración de autoridad

Yo: Darlin Leyva Matos

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad 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: Darlin Leyva Matos

Tutor: Dr. Alberto Velázquez del Rosario

Firma: _____

Firma: _____



Resumen

En el presente trabajo se verifica la resistencia mecánica en los dientes rascadores clave 11 del mecanismo de barrido de los Hornos de Reducción, se realiza el análisis químico y microestructural a muestras de dientes después de la rotura en explotación fabricados con acero inoxidable HK 40. Con el análisis tenso-deformacional se comprobó la resistencia de los dientes clave 11 obteniéndose como tensión máxima $9.231 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ inferior a la tensión admisible del material a la temperatura máxima de trabajo.

Se identifican como factores de gran influencia en la rotura el excesivo contenido de carbono de los dientes analizados 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. Se realiza la valoración de los resultados obtenidos, impacto económico y el impacto ambiental de la planta.



Abstract

In the present work it's verified the mechanical resistance in the teeth scrapers key 11 of the mechanism of sweeping of the Ovens of Reduction, it's carried out the chemical analysis and microstructural to samples of teeth after the break in exploitation manufactured with stainless steel HK 40. With the analysis tense-deformational it's was proven the resistance of the teeth key 11 obtaining as maximum tension $9.231 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ inferior to the acceptable tension of the material to the maximum temperature of work.

As factors of great influence in the break were identified the excessive content of carbon of the analyzed teeth that they promote the formation of carbides in the border of the grains of the material and the presence of strange bodies (clinker and/or bricks of the lining of the ovens) that come off during the operations. It's carried out the valuation of the obtained results, impact economic and the environmental impact of the plant.



Agradecimientos

Agradezco a mi familia en general, a mi padre, y en especial a mi madre por estar siempre a mi lado, por su dedicación y por su ejemplo que ha sido siempre la principal fuente de inspiración.

A mi tutor, el Dr. Alberto Velázquez por dedicarme parte de su preciado tiempo.

A la Revolución por haberme dado la oportunidad de formarme como profesional.

A mi primas Yeisley y Yelennys, a mis primos Carlos, Orleydis por la ayuda que me brindaron.



Dedicatoria

Este trabajo lo dedico a mi madre Lidia y a mi tía Livia por el apoyo que siempre me han brindado y por siempre alentarme para alcanzar mi sueño de graduarme.



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.

Índice

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.1. INTRODUCCIÓN.....	4
1.2. PROCESO TECNOLÓGICO DE LA PLANTA DE HORNOS DE REDUCCIÓN.....	4
1.3. ESTADO DEL ARTE.....	6
1.4. PROBLEMAS DEL PROCESO	10
1.5. MATERIAL DE LOS DIENTES DEL SISTEMA DE BARRIDO	10
1.6. ACEROS INOXIDABLES.....	12
1.6.1. Aceros inoxidables martensíticos	12
1.6.2. Aceros inoxidables ferríticos.....	12
1.6.3. Aceros inoxidables endurecibles por precipitación.....	13
1.6.4. Aceros inoxidables dúplex.....	13
1.6.5. Aceros inoxidables austeníticos	13
1.7. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LOS ACEROS INOXIDABLES	15
1.8. FRAGILIDAD EN LOS ACEROS POR PRECIPITACIÓN DE FASES	19
1.9. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO I.....	20
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS	21
2.1. INTRODUCCIÓN.....	21
2.2. FUNDAMENTACIÓN DE LAS PROPIEDADES A INVESTIGAR	21
2.3. ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL	22
2.3.1. Selección y preparación de muestras.....	22
2.3.2. Análisis de microdureza	26
2.4. ANÁLISIS QUÍMICO	26
2.5. ANÁLISIS TENSO-DEFORMACIONAL	27
2.5.1. Fases básicas del procedimiento del análisis del MEF	27
2.5.2. Condiciones y parámetros para el cálculo.....	29
2.5.3. Fundamentos físico-matemáticos para la modelación.....	30
2.5.4. Coeficiente de seguridad.....	34
2.6. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO II.....	35
CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	36
3.1. INTRODUCCIÓN.....	36
3.2. ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL	36
3.3. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	39
3.4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS TENSO-DEFORMACIONAL	41
3.5. COEFICIENTE DE SEGURIDAD	44
3.6. VALORACIÓN ECONÓMICA.....	45
3.7. IMPACTO AMBIENTAL	46
3.8. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO III.....	49
CONCLUSIONES	50
RECOMENDACIONES	51
BIBLIOGRAFÍAS	52
ANEXOS	55

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 nuestro 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.

El acero es altamente utilizado en la industria niquelífera para la fabricación de piezas de maquinas, estructuras de construcción, etc., pues de todos los materiales conocidos en la práctica, es en el que mejor se combinan la resistencia, la seguridad y la durabilidad.

Los aceros austeníticos resistentes a altas temperaturas son utilizados para hacer válvulas de motores, álabes de turbinas de gas y otras piezas 'calientes' de motores a reacción, y 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.

En el proceso de obtención del níquel mediante la tecnología de lixiviación carbonato-amoniaca, 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 sinter depende directamente de la magnitud del extractable logrado durante la reducción del mineral.

Los hornos de soleras múltiples representan un importante eslabón en la cadena productiva. La homogenización 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 ([anexo 1](#)) o paletas inclinadas que propician la descarga del mineral por la periferia o por el centro del horno de forma alterna a medida que pasa por las soleras.

Los dientes rascadores o paletas inclinadas interactúan directamente con el mineral en proceso de reducción, estando sometidos a las elevadas temperaturas del proceso y a los gases reductores producto de la combustión en las cámaras y del petróleo aditivo que se añade al mineral en la planta de secado.

Se establece como **situación problemática**:

Las roturas imprevistas de los dientes rascadores clave 11 pertenecientes al mecanismo de barrido de los hornos de reducción de soleras múltiples de la Planta de Hornos de Reducción en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, incide negativamente en la producción, ocasionando frecuentes interrupciones en el proceso productivo para la reparación de las averías y mantenimiento, con el consiguiente costo económico, y la utilización de personal que se expone a la inhalación de gases tóxicos y partículas de material microscópicas que dañan la salud humana.

El **problema científico** a investigar lo constituye:

El desconocimiento de las causas que provocan las actuales roturas de los dientes rascadores clave 11 del mecanismo de barrido de los hornos de reducción de la Planta de Hornos de Reducción en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Dado el problema a resolver se plantea la siguiente **hipótesis**:

El análisis microestructural, químico y tenso-deformacional de los dientes rascadores clave 11 permitirá 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.

Se define como **objetivo general**:

Verificar la resistencia mecánica de los dientes rascadores clave 11 del mecanismo de barrido de los hornos de reducción de la Planta de Hornos de Reducción en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Para cumplir el objetivo general, se desarrollaron los siguientes **objetivos específicos**:

1. Verificar la resistencia mecánica de los dientes clave 11 del mecanismo de barrido de los hornos de reducción de la Planta de Hornos de Reducción en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.



2. Identificar los principales factores que influyen en la rotura de los dientes rascadores clave 11 del mecanismo de barrido de los hornos de reducción de la Planta de Hornos de Reducción en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

De acuerdo a los objetivos propuestos, se plantean las siguientes **tareas**:

1. Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Selección y preparación de muestras para el análisis microestructural.
3. Análisis químico y microestructural a muestras de dientes rascadores clave 11.
4. Realizar los cálculos de resistencia mecánica de los dientes rascadores clave 11 del mecanismo de barrido de los hornos de reducción de la Planta de Hornos de Reducción en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.
5. Valoración económica e impacto ambiental.

Capítulo I. Marco Teórico de la Investigación

1.1. Introducción

Toda investigación científica debe estar sustentada por una investigación teórica y empírica, donde se utilizan métodos que caracterizan a cada una de ellas para desarrollar científicamente las mismas a partir de una clara caracterización del objetivo del problema, la hipótesis y las tareas de la investigación.

En el presente capítulo se realiza un análisis de las publicaciones y bibliografías especializadas que abordan el tema de la resistencia de elementos de acero sometidos a altas temperaturas y tensiones, con el fin de disponer de los elementos básicos esenciales para el desarrollo del trabajo. Se tratan además temas relacionados con el funcionamiento de los brazos y dientes del mecanismo de barrido de los removedores de los hornos de reducción de mineral, de los cuales depende en gran medida la eficiencia de las reacciones químicas que permiten la selección extractiva del níquel y el cobalto y la reducción del hierro que conforman el mineral alimentado el cual tiene una importancia vital dentro del proceso de obtención del Níquel.

En tal sentido el **objetivo** del capítulo es definir el estado del arte para establecer los fundamentos teóricos de la rotura de los brazos y dientes del mecanismo de barrido de los hornos de reducción de mineral laterítico.

1.2. Proceso tecnológico de la Planta de Hornos de Reducción

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.

Una vez dosificado el mineral a los hornos, con una densidad de 0,8 a 1,3 t/m³ y una humedad de 4 a 5,5 %, a través de una romana que pesa el tonelaje y luego mediante un transportador sinfín se alimenta el hogar 0, la temperatura desciende como consecuencia del encamado en el interior de los hogares. A partir de esta condición empieza el régimen normal de operaciones.

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 mineral reducido, con una densidad de 3,3 a 3,5 t/m³, es descargado al transportador rotatorio que lo conduce al tambor enfriador de donde sale hacia los canales de contacto de la Planta de Lixiviación y lavado.

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. La reducción en la cama de mineral lleva el peso del proceso, en alrededor de un 70 % de la misma, gracias al petróleo aditivo y en cierto sentido al proceso de agitación producido por el mecanismo de barrido.

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 varía 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.

La cantidad de dientes de diferentes claves varía en los distintos hogares; de uno, en el caso de los dientes clave 1 - son dientes de cierre -, hasta doscientos ochenta y uno, en el caso de los dientes clave 11.

1.3. 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 provocando 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). La existencia de estas estructuras anómalas frecuentemente son las causantes de roturas imprevistas.

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

Los problemas de roturas en aleaciones austeníticas termo-resistentes en la bibliografía consultada se refieren a elementos laminados que, a diferencia de los fundidos, se caracterizan por poseer muy bajos contenidos de carbono.

El carbono es un elemento decisivo en las propiedades mecánicas y tecnológicas de las aleaciones. Debido a las consecuencias negativas que provoca en la soldabilidad y la resistencia a la corrosión electroquímica, en los aceros laminados del sistema Fe-Cr-Ni-C la presencia del mismo se controla muy rigurosamente en cantidades que teóricamente no deben exceder el 0.1 %.

La elevación de la resistencia mecánica, en las aleaciones fundidas, se logra con el incremento de los contenidos de carbono hasta 0.4 - 0.5 %, por lo que se acentúan las diferencias en los potenciales químicos en relación con los laminados. Como resultado, en los aceros fundidos los comportamientos en cuanto a los mecanismos de segregación y precipitación de fases difieren del comportamiento manifestado en las aleaciones laminadas cuando se incrementa el contenido de elementos de aleación.

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, Microscopía Electrónica de Barrido y Microanálisis (MEB-EDAX). En el análisis microscópico se observó la formación de carburos de cromo después de la carburización, mientras que la nitruración dio lugar a la formación de nitruros de cromo.

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.

Velázquez (2002), hace un estudio detallado de la fragilización de aleaciones HH y HK 40 por precipitación de fases sigma mediante diversos tipos de análisis: químicos, comprobando la composición química de las muestras de los brazos rotos; estructurales, caracterizando el tipo de rotura y análisis tenso-deformacional mediante el Método de Elementos Finitos (MEF) con el uso del Software Ansys; estableció la relación entre la microestructura y el carácter de la rotura, y que la presencia de la δ -ferrita después de la fundición, y posteriormente su transformación en fases sigma que está relacionada con las causas de roturas prematuras de la aleación en condiciones de servicio.

Elaboró la ecuación representativa que da solución general para la predicción del estado tenso-deformacional en el dominio del tiempo de brazos fabricados con la aleación HH operando en regímenes normales de explotación para el intervalo de temperaturas de $500\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 780\text{ }^{\circ}\text{C}$.

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 % K_2SO_4 -18 % V_2O_5 a temperaturas de 560-820 $^{\circ}\text{C}$.

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 de mineral durante las operaciones. Exponen teóricamente en ausencia de cálculos verificativos de resistencia las consecuencias de las sobrecargas producidas sobre las operaciones.

Velázquez y Mariño (1996); Girón *et al.* (1997); y Velázquez y Mariño (1997), han asociado los problemas de roturas de brazos con la presencia de entallas mecánicas relacionadas con defectos de fundición. Con la incorporación de novedosas técnicas como la Microscopía Electrónica de Barrido y el Microanálisis (MEB-EDAX) al estudio de aleaciones HH.

Avery (1988), se refiere a la microestructura de aleaciones HH y HK 40 después de procesos de carburación, mencionando solamente el fenómeno de precipitación de carburos.

Naumann (1998), vincula a la fragilización por precipitación de fases producto del envejecimiento con la falla de componentes de hornos como bandejas, soportes y mecanismos agitadores sin llegar a realizar un estudio detallado del fenómeno de la problemática planteada.

Torres *et al.* (2003), en el análisis de los sistemas de transporte neumático de materiales sólidos ampliamente utilizados en la industria niquelera con tecnología carbonato amoniacal, obtuvo la densidad de las partículas, densidad aparente y composición granulométrica del mineral, parámetros determinados tomando en cuenta su importancia en la modelación matemática del proceso, y en la evaluación, cálculo y diseño de los sistemas de transporte neumático, datos de utilidad para los cálculos del mecanismo de barrido en la resistencia que ofrece la carga al mismo. Experimentalmente se confirmó que la densidad aparente toma un valor de $1,0683 \text{ g/cm}^3$, y la densidad de las partículas, de $3,0269 \text{ g/cm}^3$.

Mariño *et al.* (2008), hace un análisis del diseño de una nueva aleación de Fe-Cr-Ni-C-Al con las propiedades deseadas para fabricar brazos de hornos de reducción Herreshoff, obtuvo muestras e investigó la influencia del tratamiento térmico en la microestructura y la formación de fases utilizando la microscopía óptica y la microscopía electrónica de barrido, conjuntamente con la difracción de rayos X. Evaluó las propiedades mecánicas a temperatura ambiente y a altas temperaturas a través de los ensayos de tracción y termofluencia. Demostró la posibilidad de obtener una aleación con una durabilidad de 100 000 h a $800 \text{ }^\circ\text{C}$ bajo tensiones de 180 MPa.

Rodríguez *et al.* (2007), analiza para la determinación el mecanismo de rotura en el tubo del transportador sinfín de las instalaciones de transporte de mineral reducido en la planta de hornos de reducción de las empresas niqueleras de tecnología Caron modelando y simulando tubos con agujeros circulares usando diferentes relaciones diámetro interior/diámetro exterior con el fin de conocer la respuesta en el dominio de las tensiones. Analizó dos variantes, una con agujero rectangular de extremos redondeados

y otra con agujero elíptico. Observó que las tensiones aumentan linealmente en la medida que el diámetro del agujero se hace mayor y que las tensiones tangenciales máximas ocurren en los concentradores de tensión, demostrando que la grieta que provoca la ruptura comienza por la parte interior de los agujeros para las mayores relaciones diámetro interior/diámetro exterior así como en aquellos lugares donde la concentración de tensiones es mayor.

1.4. Problemas del proceso

Las roturas de los brazos y los dientes pueden producir disímiles alteraciones. Ejemplo de estas son: el aumento de la presión en una parte del horno y caída en otra parte producto de tupición por escorias, brazos rotos, etc. en los agujeros de las descargas de los hogares; aumento del amperaje del eje central por un brazo cargado, un brazo partido o por dientes caídos; aumento de la temperatura de la mezcla de minerales en la descarga del enfriador y pueden tupidar la descarga del hogar H16.

La fractura de los dientes puede provocar sobrecargas en los brazos, además de que provocan la rotura de otros dientes ocasionando una serie de roturas en cadena, diente fracturado, brazo roto, eje central dañado, paro del proceso productivo en ese horno; lo que implica que la carga se desvíe y alimente a otros hornos sobrecargando el mecanismo de barrido que puede comenzar un ciclo de rotura que no tiene que producirse en el momento sino que se extienden los plazos entre uno y otro.

1.5. Material de los dientes del sistema de barrido

El diseño original previó la fabricación de los dientes con el acero fundido 40X24H20C2П, designado por la norma GOST. Este acero que es equivalente al acero fundido HK 40 presenta la composición química siguiente:

C	Ni	Cr	Si	Mn	P	S	Fe
0,35 - 0,45	19 - 22	23 - 27	≤ 1,75	≤ 1,75	≤ 0,035	≤ 0,035	Balance

Tabla 1.1. Composición química del acero fundido HK 40

Los componentes químicos 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 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.

1.6. 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.

1.6.1. Aceros inoxidables martensíticos

Los aceros inoxidables martensíticos son en general aleaciones de cromo, hierro y carbono, su propiedad característica es su templeabilidad, única de todas estas series que la posee. Tienen una ductilidad mediana en frío, aunque son fácilmente deformables en caliente. Fueron los primeros que se desarrollaron industrialmente y representan una porción de la serie AISI 400, (Beddoes y Pardo, 1999).

Su principal característica es la habilidad que poseen para aumentar su resistencia mecánica y dureza mediante tratamiento térmico que produce martensita. La configuración metalográfica martensítica posee estructura cristalina tetragonal centrada en el cuerpo (BCT). El contenido de cromo es generalmente en el rango de 10.5 a 18 % y el de carbono es alto, alcanzando valores de hasta 1.2 %. El contenido de Cr y C está balanceado para asegurar la formación de la estructura martensítica durante el tratamiento térmico.

1.6.2. Aceros inoxidables ferríticos

Estos aceros inoxidables de la serie AISI 400 mantienen su estructura ferrítica estable desde la temperatura ambiente hasta el punto de fusión. Tienen una configuración metalográfica ferrítica con la estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (BCC) que se mantiene estable desde la temperatura ambiente hasta el punto de fusión. El cromo inhibe la formación de austenita y promueve la formación de ferrita.

Estos aceros son esencialmente aleaciones con cromo, cuyo contenido es usualmente del rango de 10.5 a 30 %, pero contenidos limitados de carbono del orden de 0.08 % en

relación con los martensíticos. Pueden contener molibdeno, silicio, aluminio, titanio y niobio que promueven diferentes características (Beddoes y Pardo, 1999).

1.6.3. Aceros inoxidables endurecibles por precipitación

Los aceros inoxidables endurecibles por precipitación (precipitation hardening) son aleaciones hierro-cromo-níquel que se caracterizan por la resistencia mecánica obtenida a partir del endurecimiento por tratamiento térmico de envejecimiento. Estos grados se pueden clasificar en función de su estructura en estado de recocido y del comportamiento resultante tras el tratamiento de envejecimiento, como austeníticos, semiausteníticos o martensíticos.

1.6.4. Aceros inoxidables dúplex

Los aceros inoxidables dúplex son los de más reciente desarrollo; son aleaciones cromo-níquel-molibdeno que forman una mezcla de cantidades aproximadamente iguales de austenita y ferrita. Los aceros inoxidables dúplex presentan dos fases: dispersión de austenita FCC en una matriz de ferrita BCC. La cantidad exacta de cada fase está en función de la composición y el tratamiento térmico. Los principales elementos de aleación son cromo y níquel, sin embargo la cantidad de níquel es insuficiente para desarrollar completamente la estructura cristalina austenítica.

El contenido de cromo varía del 18 al 26 %, y el contenido de níquel de 4.5 a 6.5 %. La adición de elementos como nitrógeno, molibdeno, cobre, silicio, y tungsteno permite controlar el balance en la configuración metalográfica, así como impartir ciertas características de resistencia a la corrosión.

1.6.5. Aceros inoxidables austeníticos

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

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 estos materiales por su resistencia a la corrosión a grandes temperaturas.

1.7. Influencia de la temperatura en los aceros inoxidables

La temperatura es un factor influyente en la formación en el metal de estructuras anómalas, frecuentemente causantes de roturas imprevistas, que pueden actuar de forma independiente o unida a otros factores (corrosión, sobrecarga).

La fragilización en caliente es un fenómeno muy investigado desde hace muchos años. Roturas desastrosas 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).

La resistencia de los metales sometidos a altas temperaturas no se caracteriza por el límite habitual de resistencia, que se obtiene en ensayos de poca duración, sino por el así llamado, límite de resistencia prolongada (σ_{rt}). Este límite es igual a la tensión que, actuando a una temperatura constante durante cierto intervalo de tiempo, conduce a la destrucción de la probeta.

En muchos materiales que trabajan cargados a altas temperaturas, se observa el fenómeno del aumento constante de las deformaciones residuales que terminan con la destrucción de la pieza. La variación, en función del tiempo, de las deformaciones de una pieza sometida a carga, se denomina fluencia plástica (Stiopin, 1976).

Los aceros y aleaciones resistentes a altas temperaturas son aquellos que poseen elevadas propiedades mecánicas a altas temperaturas. Esta aptitud que tiene el metal de soportar cargas mecánicas a temperaturas elevadas depende mucho del tiempo de aplicación de la carga para provocar la tensión de rotura.

Con el incremento de la temperatura de trabajo de la pieza disminuye la tensión de rotura para una duración dada de actuación de la carga. Es decir, para una temperatura dada la tensión de rotura puede ser grande si la carga se aplica durante poco tiempo, o puede ser pequeña si la carga actúa durante mucho tiempo.

Por encima de cierta temperatura la resistencia disminuye tan rápidamente al aumentar la duración del tiempo de aplicación de la carga, que es necesario indicar el tiempo de

actuación de la misma (σ_t - resistencia a largo plazo). La resistencia a largo plazo (σ_t) se define como la carga que provoca la rotura a una temperatura determinada en un plazo de tiempo dado.

Cuando se aplica una carga cuyo valor es mayor que un límite determinado y la temperatura supera cierto valor, se produce un proceso de deformación continua del metal, por la acción de la carga constante, que termina generalmente con la rotura, este proceso es conocido como fluencia.

La deformación plástica hace que se endurezca el metal (acritud) y si la temperatura es alta, la movilidad de los átomos es suficientemente grande y se elimina el endurecimiento producido por la deformación plástica, produciéndose una alternación entre los procesos de endurecimiento del metal por la deformación plástica y su ablandamiento por acción de las altas temperaturas.

Para evitar la fluencia hay que hacer que la temperatura de recristalización (ablandamiento del metal), definido por la fuerza de los enlaces interatómicos, sea más alta que la temperatura de trabajo, o que su límite de elasticidad sea mayor que la tensión de trabajo a la temperatura dada. Incluso así, la fluencia solo se logra retardar con el incremento de elementos de aleación por su gran dependencia de la composición y estructura del metal.

La resistencia a altas temperaturas varía en las diferentes aleaciones dentro de ciertos límites, determinados por el tipo de aleación y por su estado estructural, así las aleaciones de molibdeno pueden trabajar a temperaturas superiores a los 1000 °C, las aleaciones de cobalto hasta 950 °C, las aleaciones de níquel entre 600 y 850 °C, las aleaciones del sistema Fe-Cr-Ni-C hasta los 900 °C, y los aceros austeníticos entre los 500 y los 800 °C.

Las propiedades de resistencia a altas temperaturas están determinadas por el contenido de la aleación y por la estructura que se obtenga en dependencia del tratamiento térmico que se le de al metal; aunque esta influencia disminuye con el aumento de la temperatura (Guliaev, 1983).

Una de las propiedades que caracteriza la resistencia de los materiales, además de la resistencia a largo plazo antes mencionada, que trabajan a altas temperaturas durante plazos de tiempos altos es el límite de fluencia (σ_f), o carga límite de fluencia, que no es mas que la carga que provoca una velocidad de deformación dada a una temperatura también dada. Para estas piezas el límite de fluencia debe caracterizarse por una deformación pequeña producida por la aplicación de la carga durante mucho tiempo.

En las aleaciones que se destinan para un servicio largo, desempeña un papel importante la llamada estabilidad estructural, pues durante el proceso de las variaciones de fase y de estructura disminuye la resistencia de la aleación. Es por esto que los excesivos procesos de coagulación que se desarrollen ejercerán una influencia negativa en las propiedades de la resistencia a altas temperaturas.

Las depuraciones de las aleaciones por los procedimientos metalúrgicos correspondientes, de las impurezas perniciosas que forman fases y eutécticas fáciles de fundir, es un medio importante de elevar la resistencia del metal a las altas temperaturas.

Los aceros austeníticos resistentes a altas temperaturas se caracterizan por su resistencia con elevadas cargas a elevadas temperaturas de trabajo, resistencia a la oxidación, gran plasticidad y gran coeficiente de dilatación lineal. Los principales componentes de estas aleaciones son el cromo y el níquel. El cromo le proporciona gran resistencia a la oxidación; mientras que el níquel mejora sus cualidades de resistencia mecánica, proporciona estabilidad a la estructura y disminuye la solubilidad del carbono en la austenita.

En las aleaciones con el % de cromo mayor a 18 y de níquel superior a 14 la estabilidad de la austenita es mayor. Los aceros al cromo-níquel industriales poseen impurezas que influyen en las condiciones de equilibrio, además de formar nuevas fases (carburos, nitruros, intermetales u otras) que pueden cambiar considerablemente las propiedades del acero (Guliaev, 1983).

Los elementos ferritizantes o formadores de ferrita son los que actúan de forma parecida al cromo. Ejemplo de estos son el molibdeno, el wolframio, el titanio, el tantalio, el niobio

y el silicio; y los elementos formadores de austenita, o que actúan de manera análoga al níquel son: el carbono, el nitrógeno y el manganeso.

En los aceros al cromo-níquel inoxidables, debido a la presencia de carbono en ellos, ocurre la formación de carburos especiales, principalmente del tipo $M_{23}C_6$. La cantidad de estos carburos depende del contenido de carbono. Los elementos formadores de carburos son: el titanio, el vanadio, el cromo, el manganeso, el circonio, el niobio, el molibdeno el hafnio, el tantalio y el wolframio. Los carburos no se forman puros en el acero sino que forman compuestos que contienen distintos elementos carburizantes.

Las altas temperaturas de operaciones de los hornos alcanzan valores que favorecen termodinámicamente la precipitación de fases, estos bajo los efectos del envejecimiento de la aleación como resultado del mantenimiento de las temperaturas en valores más o menos estables durante períodos prolongados de tiempo puede producir la rotura (Velázquez, 2002).

A temperaturas elevadas la resistencia mecánica depende mucho de la magnitud y velocidad de aplicación de la carga y del tiempo de exposición. A elevadas temperaturas, gran cantidad de materiales metálicos se comporta como materiales viscoelásticos, por lo que al ser sometidos a la acción de cargas, por ejemplo, de tracción, el metal “fluye” lentamente y surge un aumento de su longitud en el transcurso del tiempo. Por esta razón, en los cálculos de ingeniería tiene especial significación los resultados que proporcionan los ensayos que describen el mecanismo de deformación de una aleación a temperaturas elevadas (Boyle y Spence, 1989).

Las altas temperaturas operativas de los hornos propician que se añada energía térmica de activación a las oscilaciones de los átomos alrededor de su núcleo, disminuyendo la energía de enlace en las fronteras sigma/carburos. De esta manera, los átomos se desprenden con mayor facilidad de la estructura cristalina, originándose vacíos que al difundirse y concentrarse bajo los efectos de las elevadas temperaturas y cargas de trabajo, se convierten en focos potenciales para el surgimiento de grietas (Velázquez, 2002).

Los efectos de sobrecargas se acentúan bajo la influencia del incremento de las temperaturas de operación, pues, los aumentos en la carga requieren aumentos en los

valores de temperatura para mantener las condiciones de reducción, los que en ocasiones pueden alcanzar los 850 °C.

1.8. Fragilidad en los aceros por precipitación de fases

En los aceros forman carburos los elementos que en el sistema periódico se encuentran situados a la izquierda del hierro, elementos que corresponden al grupo de transición.

Los carburos enumerados no existen puros en los aceros. Como los carburos que tienen la misma fórmula química se disuelven mutuamente, formando un carburo en común, no varios carburos separados, siendo que en los aceros nos encontramos únicamente con seis tipos de carburos:

Carburos del grupo I



Carburos del grupo II



M es la suma de los elementos formadores de carburos metálicos. Los carburos en el grupo I tienen estructura cristalina compleja, mientras que la peculiaridad de la estructura de los carburos del grupo II, como fase de inserción, consiste en que tienen una red cristalina simple y cristalizan por lo general con un déficit considerable de carbono.

La presencia de estas fases de carburos tiene un efecto positivo sobre el comportamiento de la aleación ante las cargas aplicadas, mejorando la rigidez y resistencia mecánica. En sentido general, se puede plantear que las fases de carburos, aunque reducen considerablemente los valores de resistencia al impacto, bajo la acción de cargas estáticas no afectan los tiempos de rotura a temperaturas elevadas (Velázquez, 2002).

A temperatura ambiente la deformación por fluencia obedece a una ecuación mecánica de estado, donde la deformación en un instante dado depende solamente de los valores instantáneos de la tensión; pero a elevadas temperaturas, la deformación por fluencia lenta depende fuertemente de la deformación anterior y el historial térmico. Por lo tanto, cualquier expresión que describa la deformación por

fluencia a elevadas temperaturas debe incluir necesariamente los factores tensión, temperatura y tiempo.

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 FeCr, 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).

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.

Se ha podido observar que el factor común asociado a las roturas de componentes fabricados de aceros austeníticos ha sido la presencia de fases secundarias, especialmente las fases sigma.

1.9. Conclusiones del capítulo I

Las bibliografías utilizadas que tratan el tema de los aceros, esencialmente inoxidables austeníticos, fundidos, del tipo HH y HK 40, son altamente fiables y de resientes creación.

Los estudios realizados no tienen en cuenta específicamente los efectos de la carga de mineral sobre los dientes del mecanismo de barrido de los hornos de reducción.

Las principales causas de roturas encontradas en la literatura correlacionadas con elementos de hornos industriales en condiciones de servicio han sido la fragilización en caliente por procesos de solidificación, envejecimiento, fluencia, fatiga o corrosión entre otras; siendo la principal la precipitación de fases sigma.

Capítulo II. Materiales y Métodos

2.1. Introducción

Las difíciles condiciones de operación de los dientes del mecanismo de barrido a las que están sometidos: cargas de flexión originadas por la resistencia que ofrece la carga de mineral durante el barrido; elevadas temperaturas (según perfil establecido para los distintos hogares que oscilan entre 400 y 850 °C; atmósfera reductora con alto contenido de CO, CO₂ y nitrógeno, compuesta por gases provenientes de la combustión del petróleo en las cámaras y del petróleo aditivo; y prolongados tiempos de operación bajo regímenes continuos de producción, hacen que los dientes requieran propiedades especiales extremas que permitan mantener un comportamiento estable y prolongado en el tiempo.

El **objetivo** de este capítulo es fundamentar las propiedades a investigar y explicar los métodos y procedimientos para la solución del problema.

2.2. Fundamentación de las propiedades a investigar

Los estudios de fallas de elementos que operan en ambientes muy agresivos (elevadas temperaturas, alta corrosión y en presencia de partículas erosivas) constituyen uno de los principales núcleos investigativos para las industrias del níquel y principalmente para la Planta de Hornos de Reducción de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, por las incalculables pérdidas económicas y efectos sociales y medioambientales que implican para la sociedad.

Se establece el tipo de falla mediante el análisis de las superficies de fractura y la comparación de los datos iniciales disponibles con las condiciones de operación del componente respecto a las cargas actuantes. Además, se requiere de un análisis más completo, ya que las temperaturas y el tiempo influyen en la durabilidad de los mismos bajo la acción de los esfuerzos. Sin embargo, un análisis del tiempo de rotura o falla no está completo sin los consiguientes criterios metalográficos para establecer el mecanismo de la falla inicial, para ello es necesario una apropiada manipulación y selección de las muestras.

Los dientes del mecanismo de barrido de los hornos de reducción operan bajo extremas condiciones de temperatura y cargas que se acentúan al prolongarse los

periodos de servicio. El conocimiento cabal de su comportamiento en las condiciones de trabajo, debe llevar implícito una exhaustiva investigación que permita establecer la relación composición-estructura-propiedades de la aleación y sus efectos sobre la ocurrencia de roturas y el tipo de falla que se manifiesta en los mismos, a través de avanzados métodos de ensayo e investigación.

2.3. Análisis microestructural

El análisis microestructural se hace para la observación y definición del tipo de estructura que compone la muestra mediante las normas establecidas en el país y en el mundo.

2.3.1. Selección y preparación de muestras

Las operaciones de selección y preparación de muestras según la norma NC 10-56:86 para métodos de ensayo microestructural de metales de aleaciones duros y la norma internacional ASTM E 3-95 Preparation of metallographic Specimens, son las siguientes:

- 1. Selección de las muestras.**
- 2. Corte de la muestras.**
- 3. Preparación de las muestras.**
- 4. Ataque de las muestras.**
- 5. Análisis microscópico y obtención de microfotografías.**

La preparación de las muestras incluyeron las operaciones de corte, pulido, lavado, secado, ataque, lavado y secado.

1. Selección de las muestras

Los datos recopilados de los Registros de Datos de averías de la Planta de Hornos de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, y los resultados obtenidos en investigaciones previas sobre la durabilidad de componentes de hornos de reducción realizadas por Prevot, 1994; Domínguez, 1995; Velázquez y Mariño, 1996; Girón *et al.* 1997, y Velázquez 2002, permitieron establecer el criterio de decisión a tomar en

cuanto a los hogares de interés para el análisis a partir de la frecuencia de roturas manifestadas (anexo 3).

Según estos análisis, las zonas de roturas más frecuentes y con menor durabilidad mostradas por los componentes son los hogares del 5 al 15, mientras en los hogares del 0 al 4 y el hogar 16, los índices de frecuencia de roturas compilados son mucho más bajos. Se analizaron 7 muestras de dientes, procedentes de 5 hornos, las muestras fueron tomadas en las zonas más cercanas a la rotura de dientes averiados.

2. Corte de la muestras

El corte de las muestras, que se obtuvieron de fragmentos de dientes rotos, se realizó con una segueta manual minimizando la acción del calor que se produce al utilizar otro método de corte. Las dimensiones de las mismas no exceden los 20 mm, con un peso aproximado de 62,8 g.

Después se nivela la superficie de la muestra con un lima fina, la cual procede a eliminar el redondeado de los ángulos o bordes de las muestra, la refrigeración intensa es para evitar que el calentamiento durante el corte y el pulido provoquen transformaciones estructurales adicionales en las zonas objeto de análisis.

3. Preparación de las muestras

Una vez cortadas las muestras al tamaño adecuado, se obtiene una superficie plana por limado utilizando papeles abrasivos de diferentes grados, colocados sobre discos giratorios, con cuidado de reducir al mínimo la profundidad del flujo y de la distorsión del metal que tiene lugar por la superficie trabajada.

Se desbasta la muestra empleando de forma sucesiva papeles o telas de lija cada vez más finos, con la serie de 100, 200, 360, 400 y 600. El objetivo primario de este método es eliminar las capas de metal distorsionado y deslizado. Ya que en el examen del material se buscan defectos tales como grietas finas o gordas, porosidades o inclusiones. Al pasar de un abrasivo a otro, debe girarse la muestra noventa grados y desbasta hasta que se borren por completo las huellas del abrasivo anterior, teniendo siempre el cuidado de lavar las muestras con agua abundante.

La presión excesiva sobre el papel abrasivo puede causar rayas profundas y difíciles de eliminar posteriormente, además se provoca una distorsión intensa sobre el metal

de la superficie, alterando el aspecto de la estructura. Esta distorsión no se puede evitar completamente pero puede reducirse mediante técnicas adecuadas de desbaste y pulido.

Debe tenerse en cuenta que la superficie opuesta de la muestra a observar debe ser paralela para facilitar el soporte en el microscopio.

Posterior a ser lijada la muestra, y dispuesta para el acabado, se lava con agua y se aplica contra un disco que gira rápidamente y está cubierto con un tejido adecuado impregnado con una suspensión acuosa de polvo de pulir. La instalación se encuentra en un laboratorio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMMM) con las siguientes características:

Pulidora

- Potencia del motor: 3,7285 kW
- Intensidad de corriente: 2 – 5 A
- Voltaje: 250 V
- Velocidad de rotación: 1000 rev/min

Seguidamente las muestras se lavan con acetona para eliminar restos de grasa, polvo y pasta de pulir cuidando no frotar la superficie pulida y luego se limpian con etanol absoluto para eliminar cualquier vestigio de humedad. Se procede a realizar el ataque de las superficies a investigar.

4. Ataque de las muestras

Antes de atacar las muestras debe desengrasarse con alcohol y secarse con aire frío o caliente.

Para el ataque, se toma la muestra con la pinza y se sumerge con la cara pulida hacia abajo en el reactivo de ataque contenido en el cristizador o vidrio reloj. Se tiene la muestra sumergida un segundo, se extrae, se lava con alcohol, se seca y se observa al microscopio, se registra el campo observado a diferentes aumentos. Se vuelve a pulir y se repite la operación descrita anteriormente manteniendo sucesivamente la muestra sumergida durante 10, 20, 30 y 40 segundos, registrando el campo observado después de cada ataque. Mediante el ataque es posible poner de manifiesto el tamaño, forma y

distribución del grano (fases o microconstituyentes), las heterogeneidades en la estructura y las segregaciones.

Composición de los reactivos

Los reactivos más corrientes actúan corroyendo uno de los componentes de la aleación, con exclusión de los demás. Los componentes que quedan intactos aparecen con tonos claros en el examen micrográfico; el componente atacado que a perdido su pulimento no refleja la luz y aparece con tono oscuro (Kraemer, 1963).

Corrientemente se emplean determinados reactivos para distintos metales y aleaciones:

- Para hierros y aceros de bajos contenidos de carbono reemplaza el reactivo de Sauveur, solución de ácido nítrico en alcohol. Este reactivo acentúa marcadamente los límites de los granos de hierro y a veces les da color.
- Para los aceros ordinarios se utiliza la solución etílica de ácido pícrico. Después del ataque la perlita aparece en negro; la ferrita y la cementita continúan blanca.
- Para los latones y los metales antifricción de plomo-antimonio, soluciones concentradas diversas de ácido clorhídrico en agua.
- Para las soluciones ricas en aluminio, la solución acuosa con 50 % de sosa cáustica.

Después de atacadas, las superficies de las muestras se lavan con agua destilada y posteriormente en alcohol para finalmente secarlas en aire caliente.

5. Análisis microscópico y obtención de microfotografías

Para colocar las probetas en el microscopio se montan en un dispositivo con plastilina que permite una nivelación adecuada de estas.

La observación con microscopio óptico permite reconocer la presencia de inclusiones no metálicas como: sulfuros, silicatos, aluminatos, óxidos microporosidades, microgrietas y grafito.

Para la observación y caracterización de las estructuras de las muestras de los dientes rascadores del mecanismo de barrido se empleó un microscopio óptico modelo NJF al que se le instala una cámara de video con digitalizador de video acoplado ubicado en el laboratorio de ciencias de los materiales en el ISMM Moa.

Características del microscopio

- Microscope modelo; NJF-120 A
- Rating; 110 V 50/60 Hz
- Fuse; 250 mA
- Halogen lamp; 6 V, 20 W

La observación se realiza empleando distintas combinaciones de objetivo y ocular para obtener las imágenes más precisas.

2.3.2. Análisis de microdureza

El análisis microestructural se realiza con el fin de especificar, teniendo en cuenta la dureza de los mismos, los carburos u otras fases y la matriz metálica.

Los ensayos de microdureza de las probetas se realizaron con microdurómetro marca Pomo Metan P1, el cual está dotado con portaobjeto giratorio e iluminador vertical. Los procedimientos para el ensayo de microdureza se realizaron según lo establecido por las Normas NC 10-56:86 (Metalografía. Microestructura de Metales de aleaciones duras. Métodos de ensayo) y ASTM E 384-89 (Test Methods for Microhardness of Materials).

2.4. Análisis químico

La comprobación de la composición química de las muestras para verificarlas con los estándares y establecer su correspondencia con la aleación a investigar 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.

2.5. Análisis tenso-deformacional

Para evaluar la resistencia mecánica a altas temperaturas se simuló el comportamiento tenso-deformacional de los brazos y dientes rascadores del mecanismo de barrido sometidos a los efectos de las cargas de trabajo a las temperaturas de operación de los hornos utilizando el Método de Elementos Finitos (MEF), el cual constituye una potente herramienta de cálculo capaz de resolver cualquier problema formulable de la matemática, la física y la mecánica.

Este tipo de análisis permite acotar la deformación del objeto de estudio y localiza zonas altamente solicitadas. La aplicación de este método se realizó con ayuda del software COSMOS/DesignSTAR.

En el mundo existen varios sistemas profesionales que permiten realizar la modelación del comportamiento de un objeto sometido a un régimen de carga como son: COSAR, FRAME – 30, MSC/PAL2, COSMOS, ANSYS, etc.

En el trabajo desarrollado se utiliza el COSMOS/DesignSTAR 4.5 por ser este es el que más se adapta a las condiciones del problema en cuestión. COSMOS/DesignSTAR es un programa de documentos múltiples con arquitectura abierta, que hace buen uso de la Interface Gráfica de Windows.

Resulta imposible hacer uso eficiente de un programa de cálculo basado en el MEF para la solución de cualquier problema teórico o práctico si no se conocen los fundamentos teóricos del método sobre el cual está confeccionado el programa. De estos factores depende que el modelo físico -matemático refleje la misma en mayor o menor medida y por ende sus resultados.

2.5.1. Fases básicas del procedimiento del análisis del MEF

Las fases en que puede ser dividido el procedimiento de análisis en el MEF en medios elásticos continuos son:

1- Modelación de la estructura.

a) Obtención del modelo físico a discretizar:

La estructura o elemento real no siempre puede ser convertido en un modelo, para la computadora, que responde de forma exacta a la geometría del primero; pues en este sentido influyen factores como:

- El programa de cálculo con que se cuente.
- La configuración hardware y software que se pretende utilizar o elaborar respectivamente.
- La complejidad de la geometría de la estructura. En estos casos debe crearse un modelo tal que para las condiciones de apoyo se obtengan iguales esfuerzos y deformaciones (o uno de ellos) que en la estructura real.

b) Discretización del modelo:

En la discretización se seleccionan los tipos y formas de los elementos finitos que respondan al modelo físico, y en dependencia de lo cual, en gran medida, se obtendrá una respuesta más o menos aproximada a la realidad.

2- Evaluación de las propiedades de los elementos.

a) Definición de los tipos de elementos finitos a emplear. Está íntimamente relacionado con la discretización, mas aquí serán definidas condiciones de desplazamientos forzados o no y en general sobre los grados de libertad de los nodos interconectados.

b) Definir las características geométricas de los elementos.

c) Definición de las propiedades de los materiales, módulo de elasticidad (E), coeficiente de Poisson (μ), esfuerzos admisibles (σ).

3- Análisis estructural del modelo físico.

Esto implica la realización del análisis de los resultados según el modelo propuesto y la verificación de que estos responden a las condiciones de carga de la estructura real. Si los resultados obtenidos con el modelo propuesto no se corresponde con los esperados, obtenidos estos últimos de los experimentos, ensayos, o de la práctica, como criterio valorativo de la verdad, puede esto responder a diferentes factores entre los que se pueden encontrar:

- El modelo físico no responde a la estructura real.
- Los elementos finitos definidos en la discretización no son adecuados.
- La discretización no es lo suficientemente fina como para aportar los valores reales.
- No se han definido adecuadamente las características geométricas o propiedades de los elementos y el material respectivamente.

2.5.2. Condiciones y parámetros para el cálculo

Se plantearon como condiciones y parámetros iniciales para el cálculo que:

-El diseño del elemento en Autocad con las dimensiones reales de manera que exista alta semejanza entre el modelo digital y el modelo real. El formato de archivo a exportar es [sat.], que luego se importa al programa de cálculo.

-El máximo de carga, considerando como productividad del horno, la establecida según diseño original 17 t/h, actuando en el plano horizontal.

-Se desprecian las fuerzas de fricción entre la carga y los dientes debido a las pequeñas velocidades de rotación de los brazos (1,4 a 1,5 rev/min), considerándose la carga como estáticas.

-Las fuerzas de resistencia por el arrastramiento de la carga se consideran como una presión uniforme distribuida en las caras delanteras y borde lateral, actuando en el plano vertical.

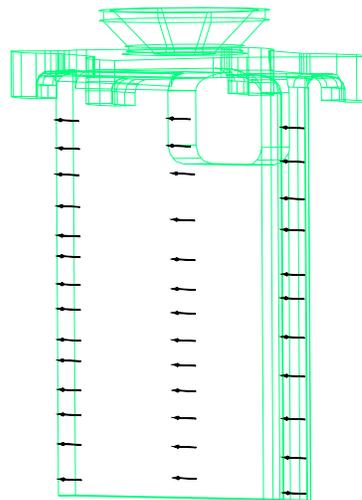


Figura 2.1. Esquema de análisis para el cálculo del diente como placa con carga uniformemente distribuida.

-Propiedades físicas de la aleación (Everhort, 1971):

- | | |
|----------------------------------|-----------------------|
| ➤ Densidad [kg/m ³]. | $\rho = 7750$ |
| ➤ Módulo de elasticidad [Mpa] | $E = 20,1 \cdot 10^4$ |
| ➤ Coeficiente de Poisson | $\nu = 0,3$ |
| ➤ Conductividad térmica[kW/m·K] | $\lambda = 613$ |
| ➤ Capacidad calorífica[J/kg·K] | $C_p = 502$ |

-Propiedades mecánicas de la aleación (Everhort, 1971):

➤ Tensión Límite de Fluencia [Mpa]	220
➤ Tensión Límite de Resistencia [MPa]	500
➤ Elongación mínima [%].	17
➤ Dureza [HB]	170

En el caso específico del análisis tenso-deformacional de elementos sometidos a la acción de cargas dinámicas, el método permite la determinación de los componentes y 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 sollicitación.

2.5.3. Fundamentos físico-matemáticos para la modelación

En la modelación matemática de un sistema se deben considerar las ecuaciones o conjunto de ecuaciones que describan físicamente el fenómeno a partir de la influencia de las variables involucradas y precisar las cuestiones relacionadas con el tipo de sollicitación a la que está sometido el elemento.

En la práctica las piezas tienen configuraciones bastantes complejas, es por esto que dichos elementos se reducen a tipos más simples; siendo así que los dientes rascadores del mecanismo de barrido tienen forma de placa, en los que la carga actúa en una de sus caras y en la parte que comprende el borde delantero y atrás de la parte curva. Placa: es un cuerpo limitado por dos planos a distancia pequeña en comparación con las otras dimensiones.

Bajo la acción de cargas exteriores que actúan perpendicularmente al plano medio de la placa, esta cambia su curvatura. Esta variación de la curvatura tiene lugar, como regla general, simultáneamente en dos planos y como resultado surge cierta superficie débilmente flexionada de doble curvatura llamada superficie elástica.

La forma de la superficie elástica se caracteriza por la ley de variación de las flechas de las placas.

Cuando se calculan las placas se considera que la mayor flecha es muy inferior al espesor de la placa. En caso de que las flechas de las placas sean muy pequeñas, en comparación con su espesor, no se consideran los alargamientos que surgen, puesto

que son pequeños en comparación con las deformaciones lineales producidas por la flexión de la placa.

Las placas cuyas flechas son comparables con su espesor se calculan tomando en consideración la tracción del plano medio.

La teoría de la flexión de las placas está basada en ciertas hipótesis o simplificaciones. La primera de ellas es la suposición sobre la indeformabilidad de la normal, que se llama hipótesis de Kirchhoff. Se supone que los puntos situados sobre cierta recta perpendicular al plano, antes de la deformación, se mantiene en línea recta, después de la deformación y esta recta es normal a la superficie de la placa deformada.

Para la solución de los diferentes tipos de placas se emplean las fórmulas obtenidas a partir de métodos exactos que proporciona la teoría de la elasticidad. Fórmula para calcular la tensión y la deflexión en placas, para cargas distribuidas se obtiene por la fórmula 1 (Fernández, 1989):

$$\sigma_{m\acute{a}x} = K \cdot q \cdot \left(\frac{R}{h} \right)^2 \leq [\sigma] \quad (1)$$

Siendo:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = Tensión máxima, (kgf/cm²).

K = Coeficiente para placas.

q = Carga uniformemente distribuida, (kgf/cm²).

R = Radio exterior de la placa, (cm).

h = Espesor de la placa, (cm).

$[\sigma]$ = Tensión admisible, (kgf/cm²).

La fórmula para la deflexión en placas es:

$$w_{m\acute{a}x} = K_1 \cdot \frac{q \cdot R^4}{E \cdot h^3} \leq [w] \quad (2)$$

En que:

$w_{m\acute{a}x}$ = Flecha máxima, (cm).

K_1 = Coeficiente para placas.

E = Módulo de elasticidad del material, (kgf/cm²).

$[w]$ = Flecha admisible.

El valor de los coeficientes K y K_1 se encuentran en las páginas 274 y 275 del Fernández, 1976. El esquema de cálculo aparece en la figura 14.18 de la página 273 del libro antes citado.

Mediante la simulación numérica el comportamiento de los dientes bajo las condiciones físicas y mecánicas de trabajo, se puede encontrar la dependencia entre las deformaciones que puedan ocurrir en el transcurso del tiempo si se aplican las ecuaciones constitutivas para la fluencia lenta.

En la etapa inicial de trabajo, figura 2.1, correspondiente a un tiempo relativamente corto, se pone de manifiesto la primera etapa de fluencia (fluencia transitoria), donde la deformación total para el estado transitorio ε_T , se puede expresar como la suma de las deformaciones elásticas ε_e y las deformaciones plásticas ε_p :

$$\varepsilon_T = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad (3)$$

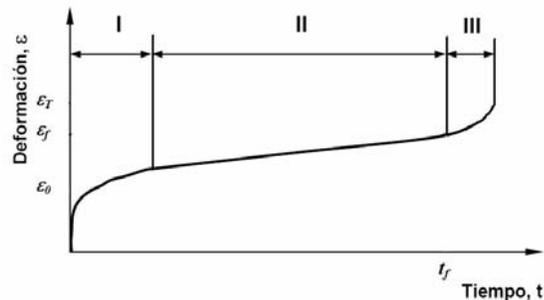


Figura 2.2. Curva tecnológica de fluencia.

Cuando se alcanza la etapa de fluencia estacionaria, segunda etapa (figura 2.1), aparecen las deformaciones por fluencia ε_f (Van Wershoven 1999) y la ecuación (3) toma la forma:

$$\varepsilon_T = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_f \quad (4)$$

Según Delobelle 1993, las deformaciones ε_e y ε_p se pueden determinar por las expresiones:

$$\varepsilon_e = \frac{1 + \nu}{E} \sigma - \frac{\nu}{E} \sigma \quad (5)$$

$$\varepsilon_p = \frac{3}{2} B_0 N_p \sigma_e^{(N_p - 2)} \sigma \quad (6)$$

Donde:

ν = Coeficiente de Poisson

E = Módulo de elasticidad del material, (MPa).

σ = Tensión de trabajo equivalente, (MPa).

B_0 y N_p = Constantes del material que definen la ley de endurecimiento deformacional por fluencia.

Mientras que las deformaciones por fluencia para tensiones planas se pueden plantear, de forma general, a través de la ecuación de Blackburn (Boyle y Spence 1989):

$$\varepsilon_f = a(1 - e^{-rt}) + b e^{-\frac{Q}{RT}} + ct \quad (7)$$

Donde:

a , b , c y r = Parámetros que dependen del material y la tensión aplicada y se compilan automáticamente por el MEF.

Q = Energía de activación requerida para la deformación por fluencia, (kJ/mol).

T = Temperatura de análisis (K).

R = Constante universal de los gases ($R = 8,314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$).

Si se comparan las ecuaciones (5) y (6) con (7), se puede observar que las deformaciones elásticas y plásticas (Ec. 5 y 6) son independientes del tiempo, mientras que las deformaciones para la fluencia (Ec. 7) son totalmente dependientes del tiempo.

Utilizando los datos recopilados por Peckner, 1987 para aleaciones pertenecientes al sistema Fe-Cr-Ni ricas en carbono, Olson, 1990, correlacionó la dependencia del módulo de elasticidad (E) con la temperatura y estableció que para temperaturas

superiores a 500 °C la misma tiene un comportamiento lineal expresado por la ecuación:

$$E = -122T + 242600 \quad (8)$$

2.5.4. Coeficiente de seguridad

Las cargas reales que actúan sobre la pieza, como las propiedades de esta, pueden diferenciarse considerablemente, en un sentido desfavorable, de las que se consideran en el cálculo, producto de factores que disminuyen la resistencia de la misma (sobrecargas, heterogeneidad del material, etc.) y son de carácter accidental, que no pueden ser previstas.

Por tanto las tensiones que garanticen un trabajo sin fallos de la máquina o de cualquier otra estructura deberán ser inferiores a las tensiones límites que puedan producir fallos o deformaciones. Con este objetivo se introduce un coeficiente de seguridad para conseguir un funcionamiento sólido y seguro de la estructura y sus partes:

$$[n] = [n_1][n_2][n_3] \quad (9)$$

Siendo:

$[n_1]$ = coeficiente que considera el error posible al determinar las cargas y las tensiones.

$1,2 \leq [n_1] \leq 1,5$ Para cálculos de alta precisión

$2 \leq [n_1] \leq 3$ Para cálculos de baja precisión

$[n_2]$ = coeficiente que tiene en cuenta la heterogeneidad del material.

En casos de materiales de poca homogeneidad (fundiciones) y en el de piezas de gran tamaño: $[n_2] = 3$.

Para cálculos partiendo del límite de fluencia y cargas estáticas, (en función de la relación entre el límite de fluencia y el límite de resistencia).

σ_f/σ_r	0,45 – 0,55	0,55 – 0,7	0,7 – 0,9
$[n_2]$	1,2 – 1,5	1,4 – 1,8	1,7 – 2,2

$[n_3]$ = coeficiente de las condiciones de trabajo que tiene en cuenta el grado de responsabilidad de la pieza, ($1 \leq [n_3] \leq 1,5$).

El cálculo del coeficiente de seguridad para una estructura ya proyectada, sus dimensiones determinadas partiendo de criterios tecnológicos o de mantenimiento, es un cálculo de revisión que se realiza con la fórmula (Feodosiev, 1969):

$$n = \frac{\sigma_l}{\sigma_{m\acute{a}x}} \quad (10)$$

Donde:

n = Coeficiente de seguridad

σ_l = Tensión límite del material

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = Tensión máxima de trabajo

En los materiales frágiles e incluso en materiales de poca plasticidad se entiende por σ_l el límite de resistencia, y en los materiales plásticos, para evitar deformaciones en la estructura se considera el límite de plasticidad como tensión límite.

2.6. Conclusiones del capítulo II

Se fundamentaron las propiedades a investigar a partir de la necesidad de la descripción y caracterización del objeto de estudio para definir sus principales regularidades.

Se mostró la forma y procedimientos para la realización de la preparación de las muestras destinadas a análisis químicos y de microscopía óptica, con el objetivo obtener una información detallada acerca de la composición química, así como la microestructura del material analizado permitiendo el establecimiento del comportamiento microestructural del acero HK.

Capítulo III. Análisis de los Resultados

3.1. Introducción

Los resultados obtenidos en los diversos análisis derivados del trabajo experimental, se valoran y profundizan en los elementos más importantes, aquellos que determinan el comportamiento del objeto investigado. Se describe el comportamiento tenso-deformacional y microestructural del acero HK 40 sometido a la acción de cargas bajo la acción de elevadas temperaturas. Además se analiza el impacto económico y medio ambiental que genera la rotura de los dientes clave 11.

El objetivo del presente capítulo es valorar los resultados de la investigación teniendo en cuenta los criterios técnicos, económicos y medioambientales.

3.2. Análisis microestructural

Para la realización del análisis microestructural se procedió a la realización de las operaciones de selección y preparación de muestras según las normas NC 10-56:86 y ASTM E 3-95: corte de las muestras, preparación de las muestras, ataque de las muestras, análisis microscópico y obtención de microfotografías.

Se desbastó la muestra empleando papeles de lija con la serie de 100, 200, 360, 400 y 600, girando la muestra noventa grados logrando se borren por completo las huellas del abrasivo anterior, teniendo siempre el cuidado de lavar las muestras con agua abundante. Luego se pule en un disco cubierto con un tejido con una suspensión acuosa de polvo de pulir.

Para el ataque, se tomó la muestra con pinza y se sumergió con la cara pulida hacia abajo en el reactivo de ataque contenido en el cristizador o vidrio reloj. El reactivo utilizado fue el conocido como agua regia que se compone de una disolución de 20 % de ácido nítrico y 60 % de ácido clorhídrico.

Se tuvo la muestra sumergida manteniendo sucesivamente durante 10, 20, 30 segundos, se lavó con alcohol, se secó y se observó al microscopio, registrando el campo observado a diferentes aumentos.

Las figuras 3.1 a) y 3.1 b) muestran microfotografías tomadas a varias muestras de dientes obtenidas después de la rotura de estos. Se observa la estructura austenítica

del metal y la presencia de precipitados intergranulares presuntamente compuestos por carburos y otros elementos.



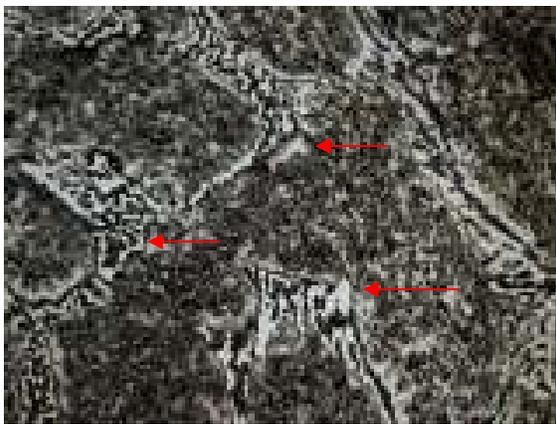
a)



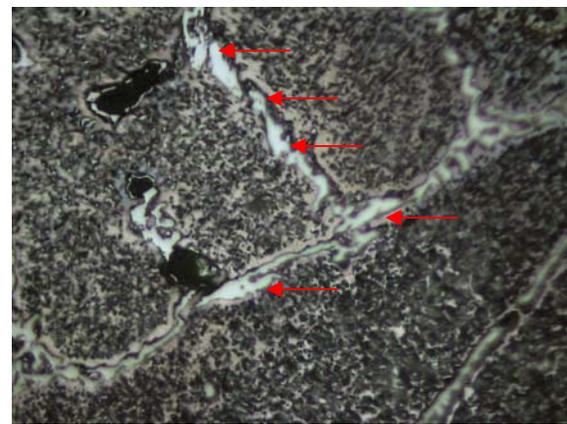
b)

Figura 3.1. Microestructura de los dientes clave 11. Micrografías obtenidas con microscopio óptico. 20X.

La observación se realizó empleando distintas combinaciones de objetivo y ocular para obtener las imágenes más precisas.



a)



b)

Figura 3.2. Precipitación de carburos en las fronteras de los granos del metal. Micrografías obtenidas con microscopio óptico. 40X.

Es evidente la precipitación de carburos en las fronteras de los granos del metal. Se corroboran los resultados de estudios anteriores expuestos por Velázquez, 2002, de que la precipitación de carburos en el borde de los granos de la aleación se considera como un proceso espontáneo e inevitable a las temperaturas de operación de los hornos de reducción, lo que significa que no se puede incidir sobre la minimización de la ocurrencia de este fenómeno en aleaciones del tipo Fe-Cr-Ni-C utilizados en la fabricación de componentes para hornos de reducción.

La estabilidad de la austenita se logra con un % de cromo mayor a 18, y de níquel superior a 14. Los aceros al cromo-níquel industriales poseen impurezas como:

carburos, nitruros, intermetales, fases sigmas u otras, que pueden cambiar considerablemente las propiedades del acero (Guliaev, 1983).

La mayor participación en los carburos la obtienen el hierro, el cromo y el carbono, mientras que otros elementos como el níquel, el silicio y el manganeso se disuelven en el compuesto. De esta forma, se describe la formación de un carburo complejo representado por la fórmula $(Fe, Cr, Ni)_{23}C_6$, es decir carburo del grupo I (Velázquez, 2002). La presencia de las fases de carburos tiene efecto positivo sobre el comportamiento de la aleación ante las cargas aplicadas, mejorando la rigidez y resistencia mecánica, bajo la acción de cargas estáticas estas no afectan los tiempos de rotura a temperaturas elevadas.

Tener en cuenta que las fases de carburos reducen considerablemente los valores de resistencia al impacto. Los elevados valores de microdureza de las fases de carburos, significan que estos poseen una gran fragilidad y por lo tanto, poca aptitud para amortiguar la energía elástica del frente de onda de la grieta, representando importantes focos de concentración de tensiones y la vía idónea para la propagación de las grietas, lo que prueba el carácter intercrystalino de las fracturas.

En cambio la abundancia de carburos precipitados que se observa en la figura 3.3 a) en la frontera de los granos del metal sugiere que esta es la vía de propagación de las grietas.

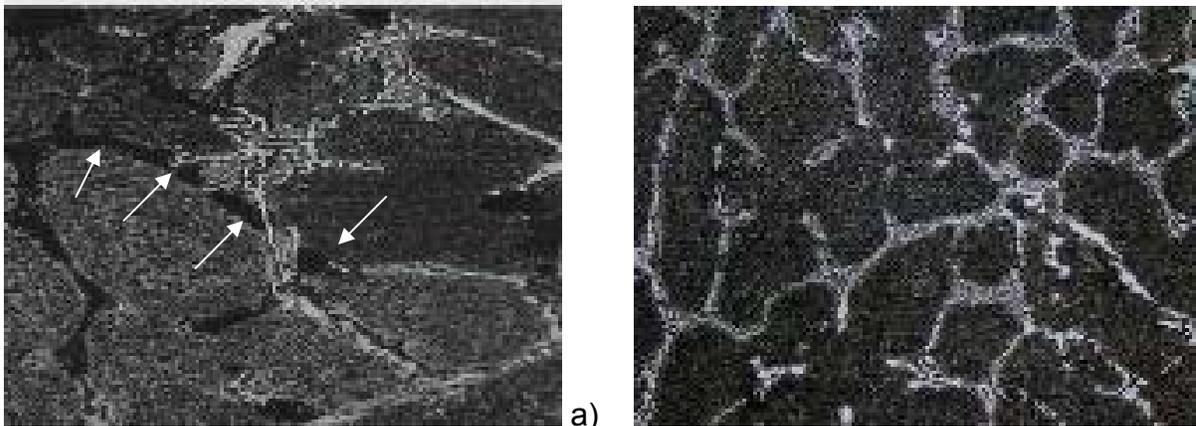


Figura 3.3. Precipitación de carburos en las fronteras de los granos del metal. Micrografías obtenidas con microscopio óptico. 40X.

Los diferentes tipos de daños presentan diversas características, por ejemplo, la presencia de microcorte, penetración de partículas duras puede ser producto de abrasión o fricción; la penetración del agente oxidante, las reacciones químicas y

desprendimiento de material se asocia con la corrosión y la formación de óxidos, aparición de influencia y desprendimiento de material con la acción térmica del medio. No obstante no se encontró en las muestras analizadas presencia de microcorte que sugieran que son fuente de roturas por estas causas.

3.3. Resultados de los análisis de composición química

La composición química se comprobó 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, con el fin de verificarlas con los estándares y establecer su correspondencia con la aleación a investigada.

La tabla 3.1 muestra los distintos resultados obtenidos para las diferentes muestras.

Muestra	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Ti	Co
1	0,62	0,38	0,62	0,018	0,135	25,03	0,07	19,18	0,023	0,02	0,10
2	0,94	1,1	0,68	0,025	0,016	23,2	0,1	19,02	0,03	0,0064	0,25
3	0,431	0,72	0,65	0,025	0,140	25,01	0,09	17,16	0,046	0,02	0,10
4	0,57	0,72	0,73	0,025	0,170	24,1	0,07	17,50	0,045	0,02	0,10
5	0,476	0,59	0,53	0,017	0,168	24,32	0,12	19,31	0,022	0,01	0,07
6	0,456	0,56	0,53	0,017	0,152	23,4	0,08	18,44	0,019	0,02	0,08
7	0,61	0,85	0,52	0,019	0,198	25,26	0,08	16,38	0,043	0,001	0,10
8	0,81	0,94	0,71	0,031	0,021	22,74	0,14	17,38	0,044	0,02	0,10

Tabla 3.1. Resultados de los análisis de composición química.

El material establecido por diseño es equivalente al acero fundido HK 40 de la Alloy Casting Institute (ACI). En los ensayos realizados a las muestras aleatorias de dientes rotos, se observa que el comportamiento del componente carbono es elevado, excediéndose de las normas establecidas por diseño incluso en el doble del valor designado llegando a los 0.94 %, en el caso del cromo su comportamiento es más estable y de menos variación entre un valor y otro.

Se observa un buen comportamiento del componente silicio, no excediéndose de las normas establecidas por diseño; el níquel con valores que varían en amplio rango, estando en el límite inferior del de diseño, siendo inferiores a los establecidos de hasta en 3 % logrando disminuir la resistencia y la tenacidad en el metal, prestar atención al

azufre, el cual exhibe valores excesivamente alto, lo que provoca fragilidad del metal en estos contenidos mayores que 0.03 %.

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

El incremento del componente carbono incide significativamente en la formación de precipitados de carburos de cromo que por su elevada dureza de 705 HV, (Velázquez, 2002) son fuente de concentraciones de tensiones que pueden propiciar que se extienda la grieta a través de los límites de los granos de la microestructura del metal.

La variabilidad de la composición química de las muestras refleja que la composición de las mismas varía entre los aceros HH y HK 40. El rango de variabilidad de la composición química de las diferentes muestras se refleja en el diagrama de la figura 3.4 (Qiu, 1993),

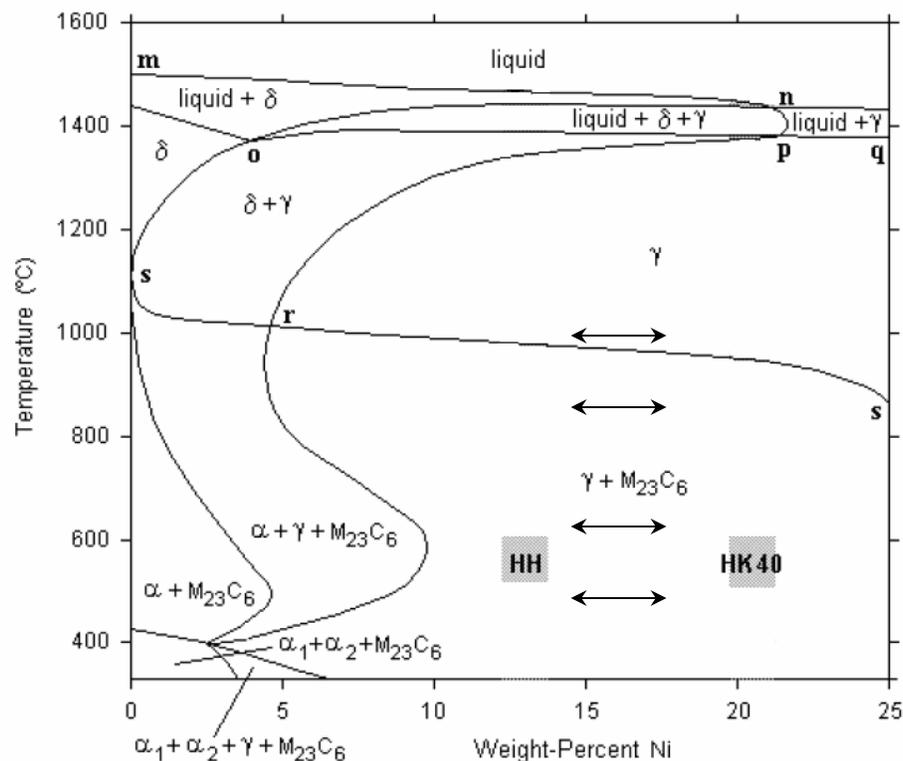


Figura 3.4. Sección vertical del sistema Fe-Cr-Ni-C calculado para 24 % Cr y 0,4 % C.

3.4. Resultados del análisis tenso-deformacional

Se utiliza el COSMOS/DesignSTAR 4.5 por ser un programa que se adapta a las condiciones del problema en cuestión. COSMOS/DesignSTAR es un programa de documentos múltiples con arquitectura abierta, que hace buen uso de la Interface Gráfica de Windows.

Se creó el elemento con ayuda del programa Autocad 2005 (ver anexo 1) con las dimensiones reales de manera que existiera alta semejanza con el modelo real, se exportó como archivo [sat.] para luego importarlo al programa de cálculo.

El módulo de elasticidad (E) varía muy poco cuando se trata de un calentamiento moderado hasta temperaturas de 300 a 400 °C. Para mayores temperaturas es necesario considerar la dependencia de E con relación a la temperatura (Feodosiev, 1969). La tabla a continuación da los valores de E para las distintas temperaturas según la ecuación (8) de Olson, 1990.

Temperatura(°C)	Modulo de elasticidad(MPa)
500	181600
550	175500
600	169400
650	163300
700	157200
750	151100
800	145000

Tabla 3.2. Módulo de elasticidad a distintas temperaturas.

En la simulación del diente rascador clave 11 se tuvo en cuenta que las fuerzas de empuje producidas por el mineral sobre las caras del diente actúan con un ángulo de 35° en la cara principal y con un ángulo de 10° en la zona curva posterior.

La figura 3.5 muestra el ángulo de acción de las fuerzas que actúan en las caras del diente rascador.

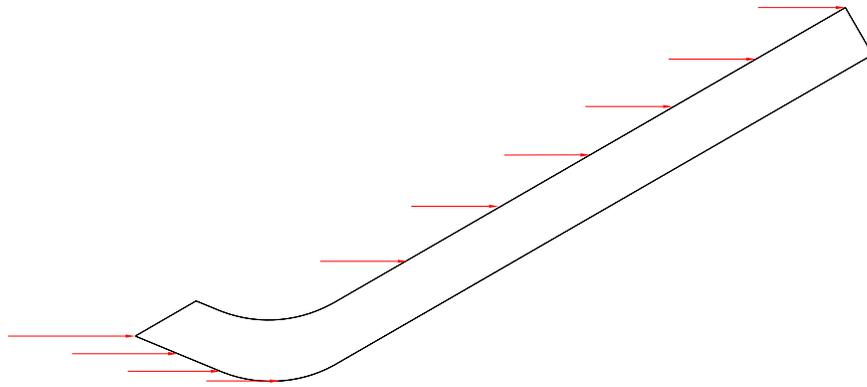


Figura 3.5. Fuerzas de empuje del mineral en las caras del diente rascador

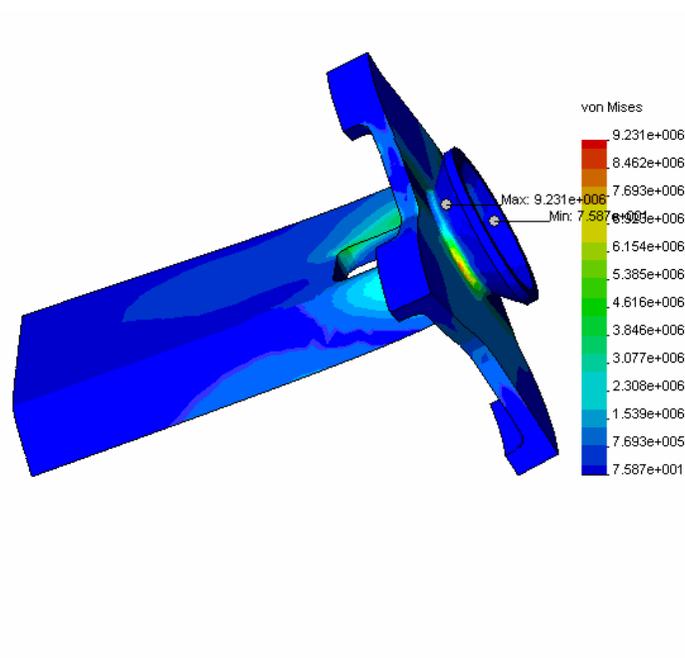


Figura 3.6. Tensiones de von Mises; Temperatura 780 °C . Tensión máxima $9.231 \cdot 10^6$ N/m²

Las tensiones máximas con valores de $9.231 \cdot 10^6$ N/m² registradas por el programa de cómputo se encuentran muy por debajo de las tensiones admisibles del material para la mayor temperatura de trabajo 780 °C , comprobándose la resistencia del elemento a las condiciones de cargas y temperaturas máximas a las que está sometido.

Los valores de tensiones máximas se encuentran donde la cola de milano se une a al base del diente y existe un cambio brusco de sección; al igual que en la base de la paleta del diente siendo el radio en esta sección de 10 mm.

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.

En los materiales frágiles no se produce la redistribución de tensiones, de aquí la sensibilidad de los aceros de alta resistencia.

Para disminuir la concentración de tensiones es necesario eliminar estos cambios bruscos del contorno de la sección longitudinal, sustituyéndolos por curvas suaves. El acuerdo de unión de las dos partes de diámetros o dimensiones diferentes debe hacerse siempre con un radio tan grande como sea posible (Stiopin, 1976).

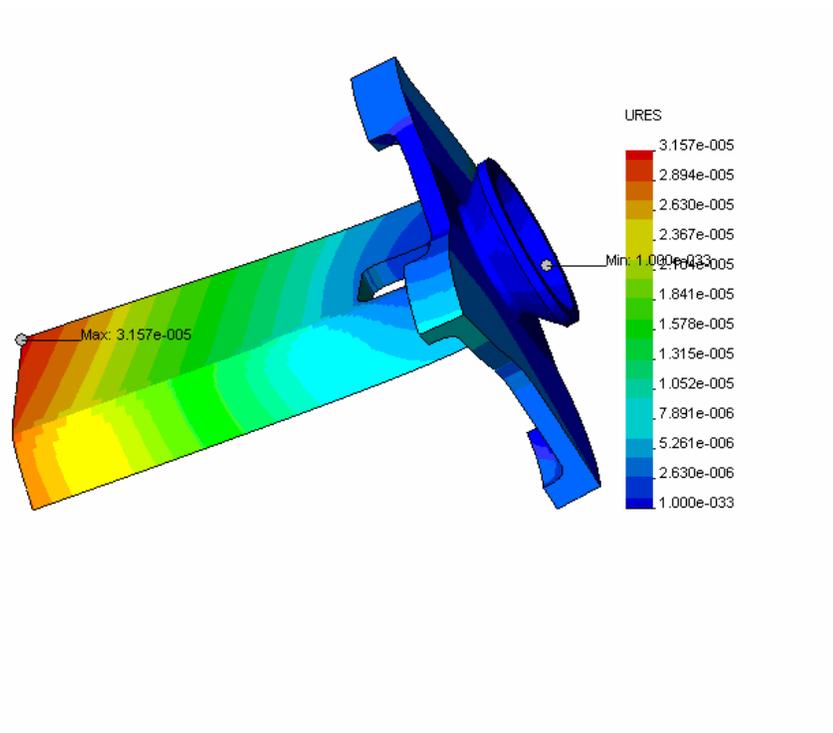


Figura 3.7. Desplazamientos. Temperatura 780 °C. Desplazamiento máximo $3.157 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$

Los desplazamientos máximos $3.157 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ no dificultan el trabajo de los dientes en su proceso de barrido de mineral, estos se registran en el extremo de la paleta de los dientes. El mayor desplazamiento es muy inferior al espesor del diente comportándose el mismo como un elemento en forma de placa.

Con el análisis de tenso-deformacional realizado se pudo comprobar la resistencia del elemento para las condiciones de cargas según diseño. Pero factores casuales como la

presencia de objetos extraños (Libros Registro 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 (Velázquez, 2002).

3.5. Coeficiente de seguridad

Para lograr tensiones que garanticen un trabajo sin fallos de la máquina o de cualquier otra estructura, estas tienen que ser inferiores a las tensiones límites del material que puedan producir fallos o deformaciones en la estructura de la pieza. El coeficiente de seguridad se haya para conseguir un funcionamiento sólido y seguro de la estructura y sus partes.

Por la ecuación (24) con $[n_1]$, coeficiente que considera el error posible al determinar las cargas y las tensiones, igual a 1,5 - cálculos de alta precisión; y $[n_2]$, coeficiente que tiene en cuenta la heterogeneidad del material, igual a 1.5 - para cálculos partiendo del límite de fluencia y cargas estáticas (en función de la relación entre el límite de fluencia y el límite de resistencia), y $[n_3]$, coeficiente de las condiciones de trabajo que tiene en cuenta el grado de responsabilidad de la pieza, igual a 1, según la ecuación (9) se obtiene $[n]$.

$$[n] = 2.25$$

El cálculo del coeficiente de seguridad para una estructura ya proyectada, sus dimensiones determinadas partiendo de criterios tecnológicos o de mantenimiento, tomando como $\sigma_l = 344678.86 \text{ N/m}^2$ el límite de resistencia, y la tensión máxima de trabajo, siendo $\sigma_{m\acute{a}x} = 114285 \text{ N/m}^2$, se obtiene con la fórmula 10:

$$n = 3.01$$

La figura 3.7 muestra el coeficiente de seguridad calculado con relación a las tensiones de Von Mises calculado por COSMOS/DesignSTAR.

Como se observa, los valores de los coeficientes de seguridad calculados según las ecuaciones (24) y (25) son elevados, lo que pudiera significar que el elemento se encuentra sobrediseñado, y bajo estas condiciones no deben fallar. Sin embargo, la

data de dientes averiados durante las operaciones refleja otra realidad: un promedio de 27 dientes en cada horno al mes.

Estos altos índices de rotura pueden atribuirse a:

1. Excesivo contenido de carbono en alrededor del 50 % de los dientes analizados que promueven la formación de densas capas de carburo en el borde de los granos que fragilizan el material.
2. La presencia de cuerpos extraños como clinker y/o fragmentos de ladrillos del revestimiento de los hornos que se desprenden durante las operaciones.

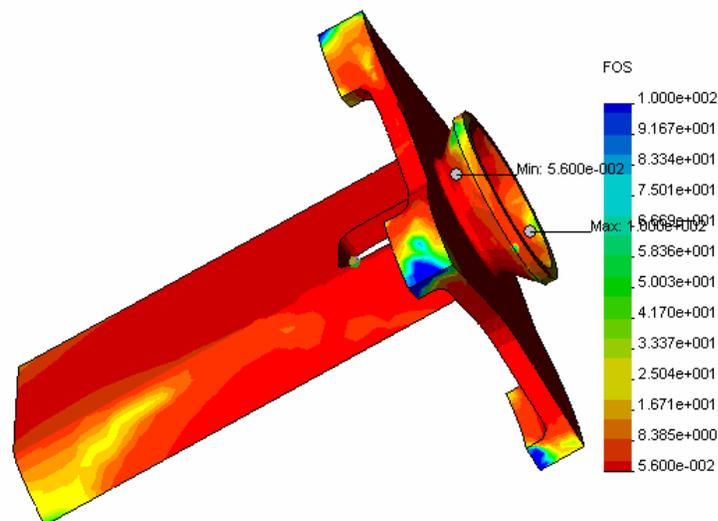


Figura 3.8. Coeficiente de seguridad. Temperatura 780 °C.

3.6. Valoración económica

Las roturas de dientes rascadores durante las operaciones originan paradas para reparación, representando uno de los renglones de mayor incidencia en la productividad y calidad del producto reducido. El tiempo promedio de parada de una instalación para la realización de las operaciones de reparación es de 4,6 horas, dejando de producirse 71.3 toneladas de menas lateríticas que garantizarían la extracción de 1 tonelada de sinter de Ni+Co aproximadamente.

Si las operaciones de cambios de dientes en un mismo horno se repiten con una periodicidad promedio de 40.33 días (ver anexo 3), al año un total de 220 reparaciones en los 24 hornos que dispone la planta, dejándose de producir 41 000 kg de sinter, que representa una pérdida de 622 790 USD/año teniendo en cuenta el precio y la producción actual.

El costo de las reparaciones del mecanismo de barrido de mineral en los hornos de soleras múltiples por concepto de cambio de dientes rascadores, teniendo en cuenta que en un horno los dientes clave 11 cambiados suman 27 dientes al mes y el precio de cada uno es de 83.36 CUC, en los 24 hornos la cifra asciende a 648 dientes y 54017.28 CUC que al año suman 648 207.36 CUC.

3.7. 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 CO₂, H₂, 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.

Efectos de las partículas (en el aire) sobre la salud humana

Las partículas, solas o en combinación con otras contaminantes representan un peligro muy grave para la salud. Los contaminantes entran principalmente al cuerpo humano por las vías respiratorias, los daños pueden presentarse directamente, ya que se ha estimado que el 50 % de las partículas que penetran a las cavidades pulmonares se depositan en el mismo.

➤ Influencia del polvo en el medio ambiente

Las partículas suspendidas en la atmósfera absorben la luz solar, reduciendo la energía que llega a la tierra y produciendo cambios que disminuyen notablemente la luminosidad y visibilidad, además de la luz solar las partículas en suspensión adsorben la luz producida por medio artificiales.

Este fenómeno se encuentra ligado a la concentración de partículas, pero así mismo influye el tamaño de estas. Para una misma concentración las partículas que absorben una mayor cantidad de energía son las de diámetros comprendido entre 0.1 a 1.5 μm .

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

- Abrasión: realizadas por aquellas partículas de mayor tamaño y dotadas de elevada velocidad (efecto de pequeña incidencia).
- Ataque químico: puede realizarse directamente por las partículas o generalmente por los gases existentes conjuntamente, tras el efecto de abrasión realizado por las partículas.

Los efectos que producen sobre la vegetación pueden considerarse como muy pequeños y prácticamente inexistentes. Tan solo pueden cifrarse como peligrosos aquellos que se derivan para zonas muy próximas a puntos de producción de partículas.

La partícula de tamaño superior a 5 μm de diámetro quedan retenida en los pelos de la cavidad nasal y también pueden quedar atrapadas por la mucosa que tapiza la traquea y la cavidad nasal. Los comprendidos entre 0.5 y 5.5 μm son capaces de penetrar hasta

el sistema respiratorio inferior depositándose en los bronquios. De aquí a que en la mayoría de los casos sean eliminados al cabo de algunas horas por respiración.

Las partículas sólidas de pequeño tamaño generalmente menores de 5 μm de diámetro, son de gran importancia porque dado su tamaño permanecen en el aire antes de sedimentarse.

Efectos tóxicos:

Pueden ser intrínsecamente tóxicas por las características inherentes químicas.

Pueden interferir con uno o más de los mecanismos que despejan usualmente el aparato respiratorio.

Puede actuar como un conductor de una sustancia tóxica absorbida en su superficie.

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

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

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

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

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

Polvos fibrogénicos: ocasionan fibrosis pulmonar característica de la neumoconiosis.

Los elementos metálicos que se relacionan en este trabajo tienen las siguientes características toxicológicas sobre el hombre.

Níquel: La aspiración de aerosoles ricos en sales solubles de níquel puede provocar corizas crónicas y sinusitis. A pesar que la dermatitis de níquel es provocada normalmente a través de contacto externo con aleaciones de níquel o sales se ha reportado también reacciones alérgicas en pacientes sensibles.

Cobalto: Presenta propiedades dañinas sobre el riñón, también se le atribuyen la aparición de dermatitis por ser altamente irritante.

Hierro: Los polvos finos de óxido de hierro son inertes y pueden como máximo interrumpir las funciones de los órganos respiratorios.

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 al 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.

3.8. Conclusiones del capítulo III

1. En el análisis microscópico realizado a las diversas muestras de dientes rascadores se observó la presencia de carburos intergranulares y otros precipitados.
2. Se comprobó la resistencia de los dientes obteniéndose valores admisibles para las cargas a que están sometidas los mismos durante las operaciones de trabajo.
3. El costo económico en que incurre la empresa por concepto de compra de dientes rascadores clave 11 asciende a la cifra de 648 207.36 CUC/año. Las pérdidas por paradas para cambio de dientes suman 622 790 USD/año teniendo en cuenta el precio y la producción actual del níquel.

Conclusiones

1. Se verificó la resistencia mecánica de los dientes rascadores clave 11 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 microestructural, químico y tenso-deformacional de los dientes rascadores clave 11 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. La rotura de los dientes clave 11 se atribuye al excesivo contenido de carbono en alrededor del 50 % de los dientes analizados que promueven la formación de densas capas de carburo en el borde de los granos que fragilizan el material y a la presencia de cuerpos extraños como clinker y/o fragmentos de ladrillos del revestimiento de los hornos que se desprenden durante las operaciones.
4. El costo económico en que incurre la empresa por concepto de compra de dientes rascadores clave 11 asciende a la cifra de 648 207.36 CUC/año. Las pérdidas en la producción de sinter por paradas para cambio de dientes suman 622 790 USD/año teniendo en cuenta el precio y la producción actual del níquel.

Recomendaciones

- ✚ Que se continúen los estudios de los dientes rascadores y su influencia en los distintos elementos que componen el mecanismo de barrido de los hornos de reducción, ejemplo: en la transmisión cónica, en el electromotor que proporciona rotación del eje, etc.
- ✚ Continuar e intensificar el monitoreo a los dientes rascadores fundidos en la Empresa Mecánica del Níquel para que los mismos cumplan con las composiciones químicas estándares de diseño.

Bibliografías

- ASTM HANDBOOK. Failure Analysis and Prevention, Ohio: ASM International, 1996.
- AVERY, R. y C. M. Schillmoller: Repair Welding High Alloy Furnace Tubes. En: Hydrocarbon Processing No.1 1988.
- BEDDOES, J y J. Gordon: Introduction to Stainless Steels, Hitchin: ASM International, 1999.
- BOYLE, J. y J. Spence: Stress analysis for creep. Londres: Butterwoths, 1989.
- DOMÍNGUEZ, A.: Influencia del perfil de temperaturas en la formación de clínker y rotura de brazos. Informe Técnico. Empresa Ernesto Che Guevara, 1995.
- EVERHORT, John L.: Engineering properties of nickel and níkel alloys, P. E. Plenum press New York-London, 1971.
- FERNÁNDEZ, G.: Resistencia de materiales. Tomo II.
- FEODOSIEV, V. I.: Resistencia de materiales. Tomo I. Instituto del libro La Habana. 1969.
- 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.
- GULIAEV, A. Metalografía. Tomo I. Moscú. Editorial Mir. 1983.
- GULIAEV, A. Metalografía. Tomo II. Moscú. Editorial Mir. 1983.
- LAI, G. Y.: Heat Resistant Materials for Furnace Parts, Trays and Fixtures: Heat treating. ASM Handbook, Ohio: ASM International Vol. 1. 1992. Págs.: 510-518.
- 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.
- MEYER, M. de; D. Toch y B. C. Cooman: The characterization of retained austenite in trip steels by X-Ray Diffraction. En: Proceedings of 41th Mechanical Working and Steel Processing Conference. Baltimore, MD. 2001. Vol. XXXXVII. Págs.: 483-491.

NAUMANN, K.: Failure Analysis, Case Histories and Methodology, Stuttgart: Riederer-Verlag, 1998.

NORMAS CUBANAS:

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

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

NORMA INTERNACIONAL:

ASTM E 3-95. Preparation of Metallographic Specimens.

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.

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

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

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

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.

QIU, C.: Thermodynamic calculation and precipitation of carbides in the Fe-Cr-Ni-C system. En: Steel research. Vol. 64, (12), 1993. Págs.: 618-622.

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

STIOPIN, P. A.: Resistencia de Materiales

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.

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

WEBSITES:

<http://www.ismm.edu.cu/sites/revistamg/v18-n1-2001/art9-1-2001.pdf>.

Anexos

Anexo 1

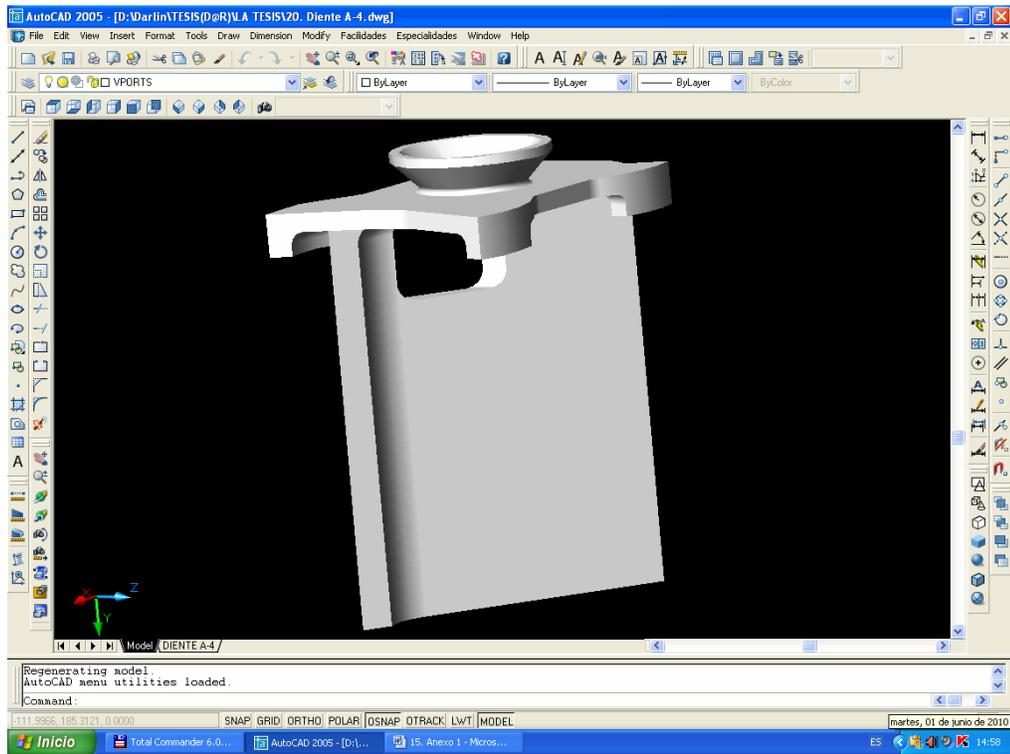


Figura 1. Diente clave 11 del mecanismo de barrido de los hornos de reducción. Vista general.

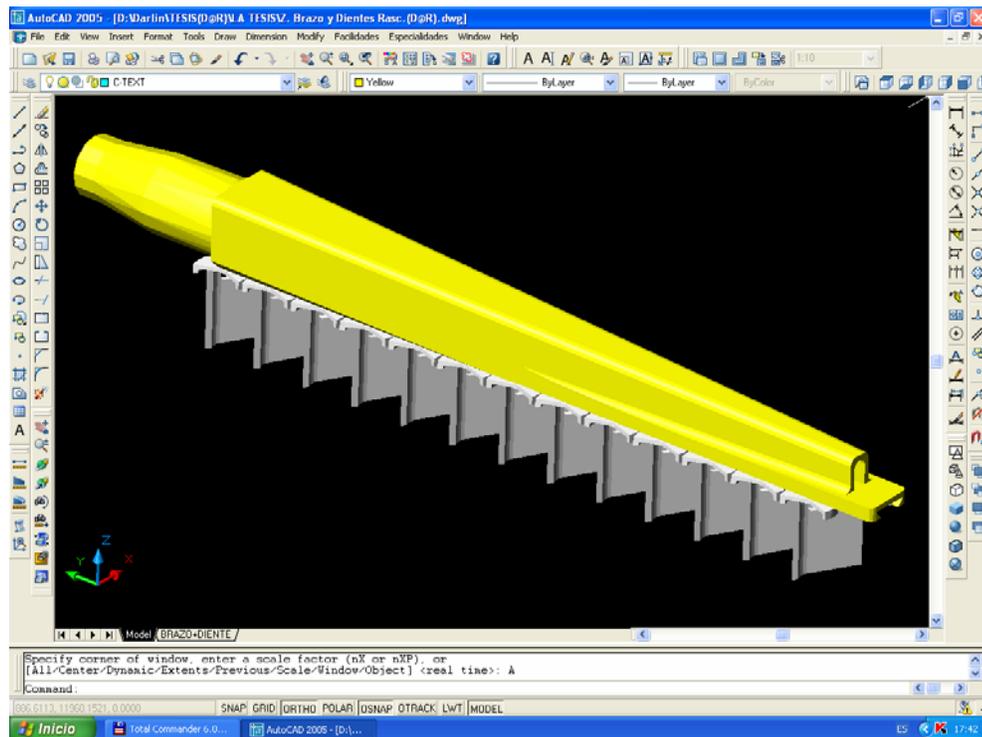


Figura 2. Vista general de un brazo con dientes acoplados.

Anexo 2

Temperatura y flujo de mineral en los Hornos de Reducción.

Periodo total	Temp. Prom. H1	Temp. Prom. H2	Carga Mineral Prom	Carga Mineral Prom
8:46:38	759,5512642	791,8793871	9,303344516	11,14043081
	Temp. Máx H1	Temp. Máx. H2	Carga Mineral Máx	Carga Mineral Máx
	777,27289	899,72821	17,37341	22,56759

Temperatura y Flujo de mineral en los Hornos de Reducción

Tiempo	Temp.Horno 1	Temp. Horno 2	Flujo de mineral 1	Flujo de mineral 2
7:36:50	764,62183	770,69324	5,39394	6,98281
7:40:32	763,98065	770,96564	8,07238	10,21772
7:53:20	763,96155	770,96564	10,70689	13,19327
7:49:46	763,08307	770,98547	13,33419	16,67603
8:06:42	763,74176	771,80896	16,02507	20,20538
8:19:20	763,98065	771,99752	8,35879	10,56074
8:28:50	763,49371	771,99752	2,86233	3,56229
8:34:20	762,32062	771,99752	5,45854	7,01095
8:42:58	761,66351	772,20743	8,03346	10,5807
8:51:36	758,89374	772,68439	10,71599	4,14185
9:00:14	759,17456	772,83405	13,20887	17,69136
9:08:52	759,99127	772,05475	15,88422	21,12987
9:17:30	759,85773	772,16925	7,26419	9,66904
9:26:08	759,01819	772,29285	2,72725	3,96848
9:34:46	757,81601	772,09291	5,34162	7,57725
9:43:24	755,97931	772,25043	8,12748	11,16167
9:52:02	754,98071	772,95154	10,82754	14,71927
10:00:40	754,09308	773,00879	13,50443	18,27578
10:09:18	752,58649	772,92255	16,27796	21,89631
10:17:56	751,37982	772,81799	6,61306	8,84089
10:26:34	750,96313	773,12585	3,19058	4,15754
10:35:12	751,43939	773,88647	5,76804	7,68874
10:43:50	752,12854	774,00098	8,32353	11,34523
10:52:28	753,11084	774,78326	11,0332	14,96834
11:01:06	754,38922	774,97406	13,78995	18,61354
11:09:44	755,69061	774,97406	16,46029	22,20098
11:18:22	755,58136	775,60449	5,94462	7,80481



11:18:22	755,58136	775,60449	5,94462	7,80481
11:27:00	754,97156	777,57819	3,35432	4,2562
11:35:38	755,16235	779,02069	6,0046	7,8055
11:44:16	755,94464	779,19238	8,65265	11,38277
11:52:54	755,93402	778,98248	11,26515	14,86711
12:01:32	756,34076	779,24963	13,95339	18,17555
12:10:10	757,02386	779,99377	16,70393	21,4865
12:18:48	756,83612	796,97925	5,62984	5,92298
12:27:26	755,96375	858,02094	3,36041	2,12332
12:36:04	756,30768	899,72821	6,11146	5,01272
12:44:42	756,99561	868,78003	8,7705	0,48777
12:53:20	757,48181	867,65662	11,272	3,55899
13:01:58	757,76801	869,74097	13,93804	7,00071
13:10:36	758,54041	870,97815	16,478	10,56491
13:19:14	758,97998	871,19214	4,69262	3,80129
13:27:52	758,97998	863,75348	3,4057	4,4749
13:36:30	758,41675	848,84698	6,00222	7,87214
13:45:08	757,73901	828,56671	8,72957	11,22459
13:53:46	756,99561	809,62281	11,43951	14,61023
14:02:24	756,99561	795,62482	14,11272	18,00541
14:11:02	756,11487	784,08844	16,9179	21,38713
14:19:40	754,72351	774,59705	3,40742	4,54861
14:28:18	752,60408	766,66182	3,45261	4,66805
14:36:56	759,96301	760,33551	6,21899	8,05988
14:45:34	772,16638	763,35962	8,89941	11,47582
14:54:12	777,27289	766,90681	11,62409	14,89817
15:02:50	776,84625	769,03851	14,39577	18,36364
15:11:28	775,39386	773,44226	17,07316	21,8462
15:20:06	771,48004	778,77032	2,62314	3,34421
15:28:44	767,17041	784,19714	3,7794	4,89104
15:37:22	764,78198	788,75403	6,47817	8,41705
15:46:00	762,21301	792,48541	9,17951	11,87824
15:54:38	762,38505	796,84723	11,87463	15,41259
16:03:16	763,68451	800,77856	14,57314	18,99431
16:11:54	762,59937	803,80975	17,37341	22,56759

Anexo 3

Paradas imprevistas por roturas de brazos, dientes y por tupiciones en distintos hogares.

Hr-5	10/07/09	Un brazo partido en H15. Un brazo partido en H6.	Cambio de dientes
	3/08/09	Un brazo partido en H6. Un brazo partido en H7. Un brazo partido en H12.	Cambio de dientes Cambio de dientes
	5/11/09	Un brazo partido en H13.	
Hr-8	17/07/09	Cuatro brazos partidos en H11.	Cambio de dientes
	14/08/09	Un brazo partido en H8.	Cambio de dientes
	20/10/09	Un brazo partido en H11.	
Hr-3	2/07/09	Un brazo partido en H10.	Cambio de dientes
	4/07/09	Un brazo partido en H7.	Cambio de dientes
	8/08/09	Un brazo partido en H15.	
	21/08/09	Dos brazos partidos en H12.	Cambio de dientes
Hr-9	11/07/09	Cuatro brazos partidos en H5.	Cambio de dientes
	5/11/09	Cuatro brazos partidos en H9.	
	5/11/09	Cuatro brazos partidos en H9.	
	9/11/09	Cuatro brazos partidos en H7.	
Hr-10	11/07/09	Un brazo partido en H11. Un brazo partido en H12.	Cambio de dientes
Hr-6	9/08/09	Dos brazos partidos en H15.	Cambio de dientes
	4/09/09	Un brazo partido en H11. Tres brazos partidos en H10.	Cambio de dientes
	16/10/09	Un brazo partido en H7. Un brazo partido en H11.	Cambio de dientes
Hr-20	11/08/09	Tres brazos partidos en H9.	Cambio de dientes
Hr-21	21/08/09	Cuatro brazos partidos en H11. Tres brazos partidos en H12.	Cambio de dientes
Hr-24	24/08/09	Un brazo partido en H15. Cuatro brazos partidos en H16.	
	25/08/09	Tres brazos partidos en H11. Un brazo partido en H12.	Cambio de dientes
	29/08/09	Tres brazos partidos en H11.	
	3/09/09	Cuatro brazos partidos en H7.	Cambio de dientes
	9/11/09	Un brazo partido en H11.	Cambio de dientes
Hr-23	28/08/09	Un brazo partido en H15.	Cambio de dientes
Hr-21	7/09/09	Dos brazos partidos en H16. Un brazo torcido en H16.	Cambio de dientes Cambio de dientes
Hr-4	20/10/09	Un brazo partido en H11.	
	22/08/09	Un brazo partido en H12.	Cambio de dientes
Hr-11	6/11/09	Un brazo partido en H15.	Cambio de dientes
Hr-19	14/11/09	Un brazo partido en H3.	