



**MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”**

**FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MECÁNICA**

**TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE
MASTER EN ELECTROMECAÁNICA**

**TÍTULO: VIABILIDAD DE UTILIZACIÓN DEL ACERO
AISI 420 EN ESTADO DE FUNDICIÓN
PARA IMPELENTES DE TURBO-
AEREADORES DE LA EMPRESA “RENÉ
RAMOS LATOUR”**

**AUTOR: Ing. Miguel Ángel Muñiz Nueva
TUTOR: Dr. C. Alberto Velázquez del Rosario**

Moa, Septiembre de 2010

Agradecimientos

A la revolución por brindarme la posibilidad de estudiar y superarme, a su líder indiscutible Fidel Castro Ruz que con su firmeza y dedicación son motivos de inspiración para todos los cubanos.

A mi tutor Dr. Alberto Velázquez del Rosario por su ayuda desinteresada para que esta investigación se realizara con la profundidad requerida, y con la calidad necesaria.

A ingeniero Félix Alberto Ramírez Sendón por su colaboración y esmero en la fundición de las muestras experimentales y el uso de sus laboratorios.

Al ingeniero Agustín Jum por su ayuda en la recolección de la información de forma oportuna, eficiente y poner a mi disposición los documentos necesarios para la búsqueda de información.

Al técnico del laboratorio de materiales del instituto por su ayuda en la realización de los ensayos.

Al Dr. Alberto Turro Breff quién en todo momento nos ha tendido la mano, su apoyo y aliento permanente para la realización de este trabajo.

A todos los que de una forma u otra han colaborado para que se realice este proyecto de investigación.

Un agradecimiento muy especial a mi esposa Maritza Almira Macías por su colaboración constante, sacrificio y cooperación para la culminación de forma exitosa de lo que resultó una meta para mi.

A mis hijos y familia en general.

A todos de corazón: ¡**Muchas Gracias!**

Dedicatoria

A la memoria de mis seres más queridos mi madre y mi padre, por ser ejemplos de inspiración en mi vida personal.

A mis hijos, esposa y demás familiares que han suplido mis obligaciones para con ellos.

A los amigos y compañeros de trabajo.

Resumen

Se presentan los resultados de una investigación destinada a la búsqueda de soluciones para mejorar el funcionamiento de los turboaeradores de la Planta de Lixiviación de la Empresa Cdte. René Ramos Latour, de Nicaro. Se propone una solución al problema del desgaste que se manifiesta en los impelentes de dicho equipamiento, de forma tal que se logren los parámetros permisibles de arenamiento y se presenta el material con las características físicas, químicas y mecánicas, para aumentar la durabilidad de los mismos. Se sustituye el material utilizado por un acero de alta resistencia del tipo AISI 420 (4X13 de la norma GOST), el cual se caracteriza por su alta resistencia al desgaste y su dureza, pertenece al tipo martensítico. Se realizó el análisis de la composición, microestructura y la dureza del material en estado de fundición para determinar la viabilidad de utilizar el mismo en estas condiciones, de manera que se garantice la durabilidad de los impelentes analizados. EL material propuesto y evaluado cumple con los requisitos técnicos establecidos, mostrando un comportamiento mecánico y químico acorde con las exigencias.

Abstract

Results from an investigation in order to find answers for the improvement of fans from the “Commander René Ramos Latour” Enterprise Leaching Plant are presented. The solution for the wearing of impellers is presented in order to get permissible parameters of sanding together to the proposition of the right material with physical, chemical and mechanical properties that ensure their durability. The previous material was substituted by AISI 420 martensitic steel, which is characterized by its high hardness and it is wearing resistant. The chemical composition, microstructural and hardness profile analysis were done under as-cast and hardening conditions were done. This material accomplishes technical requirement and shows mechanical and chemical behavior, according to specifications.

Introducción

La Industria cubana del Níquel se ha convertido en uno de los pilares más importantes en los que se sustenta el desarrollo económico-industrial del país, inmerso en el Perfeccionamiento Empresarial, como vía para lograr competitividad a nivel mundial. Este perfeccionamiento empresarial, como proceso integral, no puede estar ajeno al perfeccionamiento de su tecnología; a partir de la aplicación consecuente de los avances de la ciencia y la técnica.

Como renglón exportable, se encuentra en primer lugar no superado por otras fuentes de ingreso de carácter nacional, todo esto debido a los altos precios alcanzados en los últimos años por el níquel y el cobalto en el mercado internacional. Téngase en cuenta que Cuba es el cuarto país con más capacidad de exportación de níquel en el mundo, solo superado por los países como: Canadá, Nueva Zelanda y Estados Unidos.

El noreste de la provincia de Holguín, es el territorio donde se hallan enclavadas las dos fábricas productoras de níquel y cobalto con proceso de lixiviación “Carbonato Amoniaco” (CARON). Una de ellas es la Empresa Cdte. “René Ramos Latour”, en Nicaro y la otra es la Empresa Cdte. “Ernesto Che Guevara”, en el municipio de Moa.

En los últimos tiempos, en la Empresa Cdte. “René Ramos Latour”, se vienen confrontando algunos problemas en la Planta de Lixiviación, y más concretamente en el proceso de Lixiviación con los impelentes de los turboaeradores, debido al fenómeno de abrasión que ocasiona el desgaste prematuro de los mismos, originando cuantiosos daños en la eficiencia de esta área. Como es de esperar, estas dificultades influyen negativamente en la capacidad productiva de la planta, y por tanto de la fábrica en general, con las correspondientes afectaciones económicas y productivas.

Los turboaeradores son de gran relevancia en el proceso de lixiviación, por ser donde ocurren las reacciones químicas más importantes del proceso de producción

del níquel, aquí ocurre la separación del níquel y el cobalto del resto de los componentes.

Pocos son los estudios realizados para resolver los problemas que presentan tan importantes equipos, donde se decide la productividad y la eficiencia económica de esta planta.

Específicamente los turbos han presentado numerosos problemas debido a las condiciones de trabajo a que están sometidos y su solución no escapa de la situación económica del país y a la carencia de piezas de repuestos. A ello se suman, además, determinadas deficiencias en el orden organizativo y de operación durante el mantenimiento. Pero una de las deficiencias más importantes encontradas ha sido el mal comportamiento de los materiales que se han utilizado tradicionalmente en la fabricación de los impelentes, los que resisten muy poco las condiciones de desgaste producto a la acentuada abrasividad de las partículas de mineral en suspensión.

Según el proyecto inicial de la fábrica, los impelentes se fabricaban de aleación ASTM -106-A; posteriormente se probaron la aleación ASTM -A515, el hierro gris fundido del tipo 18-36, el acero estructural del tipo CT-3 (Norma GOST) y finalmente la aleación X27H20 (Norma GOST), sin obtenerse buenos resultados de estabilidad funcional y durabilidad en condiciones de abrasión de la pulpa sometida a la agitación.

El estudio de la ocurrencia de eventos que atentan contra el normal funcionamiento de los turboaeradores, no ha sido lo suficientemente profundo y mantiene de forma característica las siguientes insuficiencias:

1. No se ha encontrado un material adecuado que garantice las condiciones de operación de los impelentes de los turboaeradores.
2. No se han realizado estudios profundos de las características de lo más relevante del proceso de lixiviación, para la solución del fenómeno de desgaste.
3. Las operaciones de mantenimiento no se ejecutan con inmediatez, lo que trae como consecuencia el deterioro de aeradores e impelentes.

4. Se efectúan operaciones incorrectas en el proceso de extracción del impelente.

El fenómeno del desgaste es tema de gran interés y la necesidad de utilizar un material con los requisitos de dureza para contrarrestarlo, hacen que resulte de gran importancia seleccionar, en este caso, un material adecuado con determinadas características y parámetros de trabajo.

El empleo de los aceros inoxidable en la industria minero-metalúrgica ocupa un lugar determinante, debido a la combinación de sus buenas propiedades de ingeniería. La atractiva conjugación de excelentes propiedades anticorrosivas y tecnológicas con amplios niveles de resistencia mecánica, a diferentes temperaturas, lo convierten, en insustituibles en un amplio rango de aplicaciones y condiciones ambientales muy variadas.

El cromo como elemento fundamental en esta aleación, introduce cualidades mecánicas muy importantes para resolver el problema que presenta hoy dicha planta; que no ha tenido solución hasta el momento. La introducción de este acero con determinada modificación, reúne los requisitos de resistencia mecánica para eliminar la destrucción prematura de estos impelentes.

La solución a las roturas frecuentes de los impelentes en condiciones de trabajo continuo, es una de las principales tareas técnicas enfrentadas por diseñadores, especialistas y tecnólogos de la Unión de la Empresas del Níquel, en particular de la fábrica René Ramos Latour, por constituir esto, uno de los elementos decisivos en la estabilidad operacional de los turboaeradores en el flujo productivo de la empresa.

Se impone, en este caso, la selección de un material cuya composición propicie una microestructura capaz de garantizar elevada dureza, que a su vez, proporcione una resistencia al desgaste adecuada a las condiciones de operación de los turboaeradores. Después de analizar una serie de materiales con resistencia a la abrasión y estabilidad química probable en presencia de licores amoniacales, se seleccionó el acero inoxidable martensítico al cromo del tipo AISI 420.

En consecuencia, la **situación problemática** de esta investigación la constituye el desgaste acelerado de la aleación Cr-27-Ni-20 como material empleado en los impelentes de los turboaeradores en la Planta de Lixiviación y Cobalto de la Empresa Cdte. René Ramos Latour que determina una baja durabilidad de los elementos.

El **Problema Científico de investigación** lo constituye el desconocimiento de los efectos de la abrasión y el tiempo de trabajo sobre la durabilidad de impelentes fabricados de acero AISI 420 bajo las condiciones de la Planta de Lixiviación y Cobalto de la Empresa Cdte. René Ramos Latour.

El **objeto de estudio es**: la resistencia al desgaste del acero AISI 420 sometido a la acción abrasiva de la pulpa a lixiviar.

Y como **campo de acción** se tiene: evaluación del acero AISI 420 para la construcción de los impelentes como necesidad de evitar el desgaste intenso y terminar con las roturas frecuentes

Se adopta como **Objetivo general**: evaluar la resistencia al desgaste del acero AISI 420 en condiciones de abrasividad del mineral reducido sometido a lixiviación en la Planta de Lixiviación y cobalto de la Empresa René Ramos Latour.

Para cumplir el objetivo planteado se formuló la **hipótesis** siguiente:

El acero inoxidable al cromo AISI 420 posee, en estado de fundición, una microestructura martensítica de elevada dureza capaz de garantizar la resistencia al desgaste de los impelentes de los turboaeradores en contacto con la pulpa abrasiva durante la lixiviación, lo que contribuye a prolongar el tiempo de duración de estos elementos, reducir los gastos por concepto de mantenimiento e incrementar la eficiencia de la planta.

Para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto, se plantean las siguientes **tareas de trabajo**:

- Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el estudio del proceso de desgaste por abrasión.
- Determinación de las principales causas que intervienen en el desgaste de los impelentes de los turboaeradores, prestando mayor atención al fenómeno de arenamiento a través de un seguimiento sistemático de su comportamiento.
- Evaluación de la resistencia al desgaste del acero AISI 420 tratado térmicamente y en estado de fundición para determinar su posible utilización como sustituto de la aleación Cr-27-Ni-20 para impelentes de turboaeradores en la Planta de Lixiviación y cobalto de la Empresa René Ramos Latour.
- Análisis de los efectos técnicos, económicos y ambientales de los resultados alcanzados a partir de la fabricación y evaluación a escala industrial del impelente construido con el nuevo material.

CAPÍTULO I. ESTADO DEL ARTE

Introducción

La fábrica de Nicaro se comenzó a construir en el año 1942. En diciembre del 1943 lanza la primera producción de óxido de níquel y en diciembre de 1944, a raíz de la II Guerra mundial, alcanza máxima producción de diseño. En 1946 se logra la ley de níquel más alta (1.456%); pero a pesar de esto, la fábrica es cerrada a causa del bajo precio del níquel en el mercado. Posteriormente, en 1952, se reinician las operaciones y en 1954 la planta comienza a producir sínter de Ni + Co. En 1957 se lograron producir 15 776 t. La producción más alta lograda antes de 1959 fue de 20 186.1 t y después de la revolución, en el año 1983 se logró máxima producción de Ni + Co (21 135,3 t). Empresa Cdte. René Ramos Latour. Manual de Operaciones, 1991.

Según el proceso Caron, los óxidos níquel y cobalto presentes en el mineral se reducen a níquel y cobalto metálico, haciéndolos aptos para la lixiviación amoniacal. Antes de aplicársele la reducción, la mezcla de minerales se somete a un proceso de secado y molienda y después se alimenta a los hornos donde se verifica la reducción selectiva del Ni y el Co.

Después de reducido, el mineral se descarga a un transportador que lo conduce a los enfriadores, donde se le desciende la temperatura hasta valores inferiores a los 260 °C. El mineral que sale del enfriador cae a las canales de contacto, por donde se introduce una corriente de una solución carbonato amoniacal y se forma una pulpa que va a los tanques de contacto, donde, ayudada por la agitación de los turboaeradores, ocurre la lixiviación.

Los turboaeradores están compuestos por un tanque o depósito de cuatro metros de diámetro y seis metros de altura, un eje en voladizo acoplado a un reductor con un agitador o impelente de 1 225 mm de diámetro. La capacidad de estos equipos alcanza los 64 m³ en su volumen útil. La fábrica cuenta con 36 turbos en explotación.

Existen dos tipos de tanques para estos equipos: uno de chapas de acero de 12 mm de espesor y otros de concreto, que corresponden a los más antiguos. Los impelentes son accionados por un eje acoplado a un reductor con una velocidad de salida de 92 rev/min y este a su vez a un electromotor de 55 kW de potencia.

Objetivo del capítulo: Realizar un análisis de la bibliografía existente, que permita establecer el estado del arte en temática de turboaeradores, materiales y desgaste, para sustentar los resultados alcanzados en el proceso de investigación; así como los materiales empleados en la construcción de los impelentes.

Estado del arte

1.2 Fundamentos de la producción de níquel

En el proceso de obtención del níquel se utilizan dos métodos que son

- Proceso pirometalúrgico
- Proceso hidrometalúrgico

En Cuba, el método que más se utiliza es el proceso hidrometalúrgico, dentro del cual, para el procesamiento del mineral laterítico se aplican dos métodos:

- 1.- Lixiviación con amoníaco con el Ni y el Co previamente reducidos
- 2.- Lixiviación con ácido sulfúrico.

Las investigaciones del proceso de lixiviación carbonato amoniacal se remontan a finales del siglo XIX y principios del XX. En 1924 M. H. Caron estableció una patente que describe el proceso de extracción de níquel con el empleo de soluciones que contienen amoníaco y dióxido de carbono, donde se podían lixiviar el níquel y el cobalto a partir de minerales oxidados de níquel previamente reducidos; por ello, esta tecnología se denomina proceso Caron (Díaz, 2008).

La tecnología Caron se aplicó en Cuba a finales de la década del 40 (Castellanos et al, 1972), como sustancia reductora se utilizó la mezcla de gas pobre ($\text{CO} - \text{H}_2$), extraído de la combustión de carbón antracita.

Muchos han sido los trabajos realizados por distintos investigadores para mejorar la extracción del níquel y el cobalto del mineral laterítico, siguiendo la tecnología Carom.

Díaz (2008) plantea que De Graff en (1979) investigó el efecto de diferentes agentes reductores, mientras que Chandes y Sharma (1980) investigaron cómo lograr una mayor extracción de níquel, con la reducción del mineral a temperatura superior a 973 K. Rezvanov y Onishin (1970), investigaron los distintos tipos de floculantes para aumentar la velocidad de sedimentación de la pulpa, con el objetivo de encontrar la velocidad óptima de lixiviación conjunta de las lateritas y las serpentinas, y demuestra que la reducción tiene lugar a altas temperaturas y que la adición de carbono influye negativamente en la extracción de níquel y cobalto.

En 1968 Presilla y Herrera, patentaron un procedimiento para extraer níquel y cobalto de los minerales con alto contenido de hierro y bajo contenido de cobalto y de níquel, en el que se emplean soluciones de carbonato de amonio–amoniacoal y se utiliza como agente oxidante el oxígeno. Osseo–Asare y Asihene (1980), describieron, desde el punto de vista químico, la disolución y precipitación asociada con la recuperación de níquel y cobalto, en las incrustaciones de magnesio así como los fundamentos básicos del proceso Caron (Díaz 2008).

En los turboaeradores es donde ocurre la mayor parte de las reacciones químicas. Los mismos están provistos de un sistema de agitación y suministro de aire, que garantiza el oxígeno necesario para que ocurra la reacción química, además de ayudar a la agitación de la pulpa (Eliozishvili y Cabezas, 1979).

La selección del material tiene gran incidencia en el diseño y construcción de los componentes de los turboaeradores, pues en dependencia de la agresividad del medio, se escogen los materiales con mejores comportamientos para garantizar la longevidad necesaria.

1.2.3 Trabajos precedentes

Desde el mismo triunfo de la revolución comenzaron los trabajos de recuperación en la Empresa René Ramos Latour, específicamente en el área de los turboaeradores. En el mes de Enero de 1961 se iniciaron los primeros trabajos de evaluación de las modificaciones de los impelentes. Primero se comenzó en turbos independientes y se experimentaron distintos materiales para su fabricación.

López (1992), planteó que en el turbo 99 A (primera etapa), se sustituyeron impelentes de paletas curvas con conchas, por un solo impelente de disco y paletas rectas con diámetro semejante al tradicional. Se eliminaron las conchas y distribuidor de aire, y se sustituyó por uno del mismo tipo pero de diámetro 863.6 mm. A este mismo turbo 99 A (segundo período) se le aumentó el diámetro del impelente hasta 1 310 mm y se sustituyó el distribuidor de aire por uno tradicional de diámetro 457 mm al igual que (Rodríguez, 1996).

A partir de aquí continuaron los trabajos encaminados a mejorar el funcionamiento mecánico de los turboaeradores, donde sistemáticamente ocurre un fenómeno llamado arenamiento, consistente en la sedimentación de parte del material en suspensión que ocasiona el desgaste sistemático de las paletas, y por consiguiente, la rotura. En aquel momento no se pudo precisar el material adecuado y la posición ideal de las paletas para evitar este fenómeno y el deterioro del impelente.

Sin embargo, con estas modificaciones se alcanzaron mejores resultados según (Rodríguez, 1991) en diferentes indicadores como:

- Absorción del oxígeno.
- Mayor transferencia de masa.
- No usar el distribuidor acanalado.
- Disminuyó el arenamiento.
- No se aprecia gran desgaste de las paletas.
- Mayor eficiencia con las paletas rectas.
- Los impelentes de seis paletas y diámetro entre 1 175–1 180 mm mejoraron la extracción de níquel en la serie A,

En García A. (1992). Se introdujeron impelentes de disco y paletas rectas de 1 180 mm en todos los turbos de lixiviación para disminuir el arenamiento. También se realizaron modificaciones en la serie 99C y se continuó evaluando la serie A. Se decidió, además, generalizar el uso de paletas rectas en los turboaeradores metálicos a partir de los parámetros siguientes:

- Impelente de diámetro 1 310 mm.
- Largo de las paletas 390 mm.
- Ancho de las paletas 205 +/- 2 mm.
- Diámetro del disco 700 mm.

De la misma forma se introdujeron modificaciones en los turbos de concreto. Amancia, (1993) realizó un análisis de lo ocurrido y determinó el poco resultado alcanzado, pese al esfuerzo realizado y se sugirieron cuatro tipos de paletas:

- Paletas rectas.
- Paletas con sección de arco con ataque por la parte cóncava.
- Paletas con sección de arco de ataque por la parte convexa.
- Paletas de alas de avión.

En ese momento se determinó que los mejores resultados se alcanzaban con las paletas con sección de arco con ataque por la parte cóncava, las que hicieron descender el nivel de arenamiento.

En 1998), se introdujeron mejoras en la serie 100 y 103 norte que permitieron mejorar los índices siguientes:

- Extracción de níquel.
- Absorción.
- Arenamiento.
- Densidad.

No obstante a que las modificaciones desde el punto de vista de diseño mejoraron la eficiencia en el proceso, no se resolvieron los problemas de desgaste acelerado de las paletas de los turboaeradores. En general, se probaron materiales de las más disímiles características y, según Jum (66, 90, 98, 2000) estos fueron:

- Desde el año 1959 hasta 1966: aceros ASTM -106-A y ASTM –A515
- Desde el año 1966 hasta el año 1990: Fundición gris C4–18–36 (GOST)
- Desde el año 1990 hasta 1998: Acero CT-3 (GOST)
- Desde el año 1998 hasta el 2000: Fundición C4- 18 – 36 (GOST)
- Desde el año 2000 hasta el 2009: X27Ni20 (Nicromo)

1.2.5 Funcionamiento de los turboaeradores en la planta Che Guevara

Para el desarrollo de la investigación, se comprobó el funcionamiento de los turboaeradores en la planta de níquel Cdte. Ernesto Guevara, de modo que se pudiera tener una idea de su comportamiento y características que pudieran resultar comunes a los de Nicaro. Se constató que la ubicación de los turbos es en altura, en forma escalonada. No se observa derrame de material y el comportamiento de los gases de amoníaco es imperceptible.

Según Otero (1992). Los impelentes de los turboaeradores están situados a una altura de 700 mm con una separación de 40 mm del aerador. El sistema de aeración fue modificado con muy buenos resultados. Este se construyó con tubos de acero inoxidable austenítico de 150 mm de diámetro y logra mantener el nivel de aire de forma eficiente en el proceso. Para la construcción de los impelentes se utiliza acero inoxidable austenítico con un excelente tiempo de duración de hasta más de dos años; por lo que no se presenta el mismo fenómeno que en la René Ramos Latour.

1.3 Desarrollo histórico y estado actual de los aceros de alta resistencia

La obtención y aplicación de aleaciones especiales de base hierro data desde la segunda mitad del siglo XIX, cuando aún no se tenían conocimientos sobre la estructura de las mismas, ni qué relación guardaban estas con las propiedades. En inicios, la añadidura de determinados elementos como componentes de aleación para mejorar las propiedades del hierro, era algo no controlado y carente de fundamentos científicos.

Con el desarrollo y aplicación de las técnicas de análisis y microscopía para la caracterización de la microestructura de los metales, se impulsó la realización de las investigaciones relacionadas con la introducción de elementos de aleación para mejorar las propiedades del hierro (Perkins, 1980).

Velásquez A. (2002). Plantea que algunos autores como (Lefèvre 1993; Davis 1997), plantean que de manera oficial el descubrimiento de los aceros inoxidable se remonta a los inicios del siglo XX, momento en que metalúrgicos de Francia, Alemania, Inglaterra y posteriormente de los Estados Unidos, publicaron resultados de investigaciones realizadas en aleaciones de hierro y cromo, con bajos contenidos de carbono.

Según Velásquez A. (2002), Gillet y Portevin (Francia) entre 1904 y 1909, publicaron una serie de estudios sobre la estructura y propiedades del acero martensítico; con 13 % Cr y el ferrítico 17 % de Cr con cantidades de carbono desde 0.12 hasta 1.0 %. En 1909 Gillet y Giesen (Alemania) dieron a conocer los resultados de investigaciones realizadas, con aceros austeníticos del sistema hierro-cromo-níquel (Jones 1998). Estos primeros estudios permitieron la clasificación de acuerdo con la estructura de todos los aceros inoxidable en martensíticos, ferríticos y austeníticos.

El estudio realizado por Velásquez A. (2002), sobre la influencia del contenido de carbono en la resistencia a la corrosión de los aceros hierro-cromo fue planteada por Monnartz (1908) Alemania y más tarde (Lefèvre, 1993), revelaron que el carácter de inoxidable de estos materiales, era una función del fenómeno de la pasividad, donde el carácter "pasivo" del acero con contenidos de cromo depende de la densidad y estabilidad de una delgada capa de Cr_2O_3 , que se forma en la superficie del acero al entrar en contacto con el oxígeno. Esta película de óxido de cromo (II) es quien aísla el interior del material del ambiente eterno y la protege de la posterior oxidación, también lo hicieron García, y Poggio en (1965).

Fornareu, S. F y Jonson, V A. Plantearon sobre el empleo de los aceros inoxidable a escala industrial, se realizan investigaciones entre los años 1910 y 1915 (Lula, 1986;

Davis 1997), fecha en que se publicaron las primeras monografías relacionadas con la estructura y propiedades de los mismos aceros inoxidable martensíticos, por Brearley en Inglaterra.

Velásquez A. (2002), Planteó que el proceso de descarburización argón-oxígeno (DAO) fue un paso importante en la obtención de los aceros inoxidable, que constituye el punto de partida para la formación de lo que es hoy esta gran industria (Lefèvre, 1993). El empleo de esta novedosa tecnología con otras técnicas adicionales de fusión al vacío, han hecho posible que se mejore considerablemente la eficiencia y calidad de los procesos de eliminación del carbono del acero, lo que evita la oxidación y la pérdida excesiva del cromo, mejora la desulfuración y el control de la composición química de la aleación con mayor exactitud y propicia la producción de una amplia variedad de nuevas aleaciones. Esto hizo posible, además, la añadidura de elementos de aleación en estado gaseoso, como es el caso del nitrógeno.

Viswanathan y Nutting (1999) plantean la existencia de gran cantidad de aceros inoxidable, en países de Europa, América, Asia y el resto del mundo, donde ocupan un lugar insuperable los aceros de alta resistencia martensíticos con sus buenas propiedades mecánicas y tecnológicas para distintos requerimientos y exigencias técnicas.

Especialmente, dentro de la familia de aceros inoxidable, se encuentran los de tipo martensítico. Estos se caracterizan por poseer relativamente elevado contenido de cromo, que al combinarse con contenidos de carbono de hasta 0,5 %, propician la formación de una estructura martensítica de temple. El acero martensítico AISI 420, perteneciente a esta familia, logra reunir cualidades que lo hacen muy resistentes al desgaste por abrasión, y justifica el estudio para su empleo en la construcción de piezas sometidas a este fenómeno.

1.4 El desgaste por abrasión

Frómeta, F y Kovtun, C. (1982). Expusieron sobre la actualidad se presentan problemas de deterioro prematuro de elementos por abrasión e impacto en equipamiento disímiles, como agregados y piezas de equipos de laboreo minero y del proceso de obtención del níquel, dientes de palas, excavadoras, martillos de trituradoras, bolas de molinos e impelentes de los turboaeradores, entre otras. Todos estos agregados y piezas muestran como defecto principal el intenso desgaste que sufren al entrar en contacto con el mineral o con la pulpa, lo que no garantiza las condiciones de longevidad durante el servicio de operación, e implica pérdidas económicas considerables y un efecto negativo en la calidad ambiental de las áreas y diversos frentes mineros.

A pesar de la gran variedad de factores que influyen en la situación planteada tales como: tipo del mineral, régimen de explotación, etc., las propiedades mecánicas y tecnológicas que puedan presentar, se distinguen por su significación en el alargamiento del período efectivo de trabajo de los turboaeradores. Una de estas propiedades es la dureza, la cual no se ha tenido en cuenta a la hora de seleccionar el material para la construcción de los agitadores en busca de una mayor duración, que deben garantizar las condiciones de longevidad durante la explotación, prácticamente al finalizar la etapa de vida útil de los elementos.

Según Caraballo (2003). El fenómeno del desgaste es tema de gran interés y la necesidad de utilizar materiales con mayor dureza para contrarrestar el efecto de la abrasión, hacen que resulte de gran importancia hallar en cada caso el material adecuado para determinadas características y parámetros de trabajo.

El desgaste es uno de los efectos más destructivos a que están sometidos los metales, el cual se puede definir como el deterioro ocurrido a consecuencia del uso o del medio ambiente, y puede considerarse de forma general un fenómeno superficial. (Frómeta y Kovtun 1982), al investigar el desgaste de los metales en una corriente de granos abrasivos, confirmaron que existe una estrecha relación entre la resistencia al desgaste y las fuerzas de los enlaces en la red cristalina de los metales.

Con la presencia de medios químicamente activos, la resistencia al desgaste depende de la resistencia del material a la corrosión. Por eso la resistencia del acero al desgaste depende de sus propiedades físico-químicas y de las condiciones en que se produce el desgaste, en dependencia de estas, la estructura y las propiedades óptimas del metal pueden ser distintas.

Caraballo (2004), plantea que existen tres tipos de desgaste que no suelen presentarse de forma aislada, sino actúan de forma conjunta y etapas sucesivas: desgaste mecánico, desgaste térmico y desgaste por corrosión. La manifestación de estos depende de las condiciones de trabajo a las que están sometidas las piezas de máquinas y equipos. La acción conjunta de los tipos de desgastes conlleva a la destrucción del estado superficial de la pieza.

Dobrovolski (1976) y Kasatkin (1978). Explicaron que el desgaste por abrasión se caracteriza por el deslizamiento y desprendimiento de la superficie metálica, que puede estar dado por la interacción de la pieza con partículas duras de abrasivos, como las arenas que arrancan trocitos minúsculos del material. En este caso la estabilidad del material depende de la resistencia del metal a la destrucción por fragilidad y por su dureza.

La resistencia al desgaste por abrasión crece al aumentar la dureza del material que se desgasta. Los aceros con estructura martensítica más carburos, son más resistentes al desgaste que otros aceros. Los aceros con estructura cristalina gruesa son menos resistentes al desgaste que los de estructura cristalina fina. Las inclusiones de grafito empeoran las propiedades mecánicas, pero elevan la resistencia al desgaste.

Dobrovolski et al. (1976), plantea que el desgaste es resultado de un proceso producido por el rozamiento, el cual destruye gradualmente las superficies útiles de la pieza y modifica las dimensiones y la forma de esta. Como resultado del desgaste, disminuye el rendimiento mecánico.

1.5.1 Modo de acción de los distintos tipos de desgaste

Dobrovolski, (1976) y Bring. Cuello Silvestre, (1979) Expresan que el desgaste metálico abrasivo está caracterizado por el deslizamiento y arranque de la superficie metálica, la única diferencia radica en que uno ocurre entre metales y el otro con un abrasivo metálico o no metálico, por lo que el modo de acción será análogo en los dos casos.

El primer instante del funcionamiento, se caracteriza por la destrucción mecánica de las asperezas, que son despuntadas hasta un aumento de la superficie real de contacto y hay un reparto suficiente y regular de la carga; este es el período más difícil del rodaje, debido a los efectos dinámicos de choque, entre las asperezas y los efectos térmicos de calentamiento microlocalizado.

El gradiente térmico creado, da lugar a la dilatación diferencial de la pieza y como consecuencia a la creación de tensiones y además disminuye el límite elástico, todo esto puede dar lugar a un período en el que el deterioro de la superficie puede llegar a ser elevado, o mantenerse dentro de los límites captados en dependencia de la resistencia del metal a choques térmicos.

Luego de la destrucción mecánica de las asperezas en el caso de que las cargas sean pequeñas y exista fricción, siempre habrá cizalladura y las débiles microsoldaduras formadas se rompen en la misma entrecaras sin desgarrar los metales presentes. Se trata de un deterioro mecánico debido a las interacciones atómicas o moleculares, en la que sólo hay que cortar una transferencia de metal de molécula a molécula, en este caso el desgaste es pequeño.

Si uno de los metales del par de fricción es más blando, generalmente la ruptura no tiene lugar en la entrecara, sino en gran proporción en el metal más blando y solo ocasionalmente en el más duro. Si se logra en el proceso de fricción una estructura de martensita con un 5 -10 % de austenita retenida, el desgaste será pequeño.

Han sido varias las vías utilizadas para combatir el desgaste abrasivo y frenar las pérdidas que el mismo ocasiona. La resistencia al desgaste se consigue con una

alta dureza superficial, o con una aleación que reúna buenas cualidades de resistencia a la abrasión.

1.5.2 Materiales resistentes al desgaste

En la práctica se utilizan materiales resistentes al desgaste para lograr que las piezas de máquinas y equipos resistan las condiciones de trabajo, por lo que su duración depende de esta característica mecánica. El desgaste de los elementos de máquinas y aparatos puede deberse al rozamiento de las piezas metálicas entre si, y la agresión del medio de trabajo, o sea un flujo de líquido o gas y al arañamiento por partículas.

El mecanismo del desgaste es diverso (Guliaev 1983) y depende de las condiciones en que se produce este, pero lo fundamental consiste en que de las superficies del metal son arrancadas pequeñas partículas. En caso de rozamiento ordinario la superficie del metal adquiere acritud y su resistencia al desgaste por rozamiento aumenta, por consiguiente, en este caso, la aptitud del metal para adquirir acritud determina en grado considerable su resistencia al desgaste.

Según Dobrovolski, (1976), Willians (2005), Vyslozil y Filip, (1987). En el caso del desgaste por abrasión, en que las partículas duras del abrasivo (arena, por ejemplo) arrancan trocitos minúsculos de metal, la estabilidad al desgaste vendrá determinada por la resistencia del metal a la destrucción por fragilidad y por su dureza. Cuando existen medios químicamente activos, la resistencia al desgaste depende también de la resistencia del metal a la corrosión. Por esto, la resistencia de una aleación (acero) al desgaste depende de sus propiedades físico – químicas y de las condiciones en que se produce el desgaste, y según sean estas últimas, la estructura y las propiedades óptimas del metal pueden ser distintas.

La resistencia al desgaste aumenta al crecer la dureza del material que se utiliza. Los materiales con estructura cristalina fina, tienen mayor dureza que los materiales con estructura cristalina gruesa.

1.7.4 Sistemas particulados. Características generales

Turro, (2002), Díaz, (2008) y Vera (2001). Se denomina dispersión o sistema disperso a todo sistema que contiene una o más sustancias en forma de partículas dispersas en un medio. A un sistema disperso (Sólido-Líquido) se le denomina suspensión si la dimensión media de las partículas sólidas es mayor de $0.1 \mu\text{m}$ (sistema de dispersión gruesa); y si se encuentra entre 0.1 y $0.001 \mu\text{m}$ se les nombra dispersión coloidal (sistema de alta dispersión). También lo hicieron (Martínez y Rojas, 2007). Los sistemas particulados pueden ser clasificados de la siguiente forma:

Granulares: Cuando las fuerzas gravitatorias predominan sobre las fuerzas de la superficie (mayores que $50 \mu\text{m}$).

Aglomerados: Cuando la fuerza gravitatoria y de superficie son del mismo orden (partículas de $1-5 \mu\text{m}$).

Coloidales: Cuando predominan las fuerzas superficiales (partículas menores de $1 \mu\text{m}$).

El "tamaño de la partícula" está referido a dos sistemas particularmente: el monodisperso que presenta partículas que tienen la misma dimensión, y el sistema poli disperso que sus partículas tienen diferentes dimensiones.

En estos sistemas, como dimensión respectiva, se utiliza un tamaño medio de las partículas, el cual se determina con la contribución relativa de las distintas dimensiones de las partículas que lo constituyen.

Una característica estructural de gran importancia es la forma de las partículas, en general, las partículas pueden tener diversas formas: corpusculares, laminares o lineales. Estas formas pueden ser realmente complejas, pero, en primera aproximación se pueden tratar teóricamente como esferas, elipsoides de revolución, varillas o agujas, láminas, discos y filamentos. Cuando las partículas se agregan

entre sí, pueden obtenerse formas muy diferentes que, incluso, no se parecen a las formas de las partículas primarias.

Por otra parte, en dependencia del diámetro medio de las partículas sólidas y de la densidad relativa de estas, así como la concentración de la fase sólida para el flujo por conducto, las suspensiones pueden clasificarse en: homogéneas y heterogéneas.

Las suspensiones homogéneas son aquellas en que las partículas sólidas están uniformemente distribuidas en el medio dispersante y predominan las partículas finas con alta concentración de sólidos. Las suspensiones heterogéneas están formadas por partículas relativamente grandes, con concentraciones de sólidos más bajas, en las que la fase sólida y líquida conserva sus identidades separadas.

En el caso de la pulpa a lixiviarse en los turboaeradores de la empresa Cdte René Ramos Latour, se puede clasificar como una suspensión homogénea con elevada concentración de sólidos y predominio de partículas finas que, al entrar en contacto con las paletas de los impelentes, provocan el desgaste por erosión de los mismos (Martínez y Rojas, 2007).

Conclusiones del capítulo I

1. Los materiales utilizados hasta la fecha para fabricar los impelentes de los turboaeradores de la Empresa Cdte. René Ramos Latour, no garantizan buena resistencia al desgaste y se deterioran con facilidad, lo que refleja no haber investigado a fondo las principales causas del desgaste prematuro de los impelentes.
2. La pulpa lixiviada es una suspensión homogénea con elevada concentración de sólidos y predominio de partículas finas, que al entrar en contacto con las paletas de los impelentes de los turboaeradores, provocan el desgaste por arranque de pequeñas partículas y erosionan a los mimos.

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

La realización de ensayos y experimentos en la rama de los materiales, ha sido siempre una potente herramienta para el tratamiento, verificación de hipótesis y la solución a los problemas de comportamiento mecánico de elementos y equipamientos industriales.

En el campo de las aleaciones metálicas es necesario obtener suficiente información que propicien la composición, estructura y propiedades de los materiales analizados, de modo que se obtengan los argumentos necesarios para determinar la idoneidad de un material determinado.

El deterioro de estos impelentes de los turboaeradores de la planta de níquel René Ramos Latour requiere de la búsqueda de un material que posea las características físicas, químicas, mecánicas y tecnológicas necesarias que resistan las condiciones de trabajo para la cual están diseñados estos aparatos.

Objetivo del capítulo: describir los procedimientos, materiales y métodos que permiten evaluar la idoneidad del acero AISI 420 para fabricar los impelentes de los turboaeradores, como solución del principal problema al desgaste presentado.

2.2. Material propuesto y sus características

Gánguly y Vhoudki, (2007). El acero AISI 420 es un acero del tipo martensítico, cuya estructura martensítica estable a temperatura ambiente se obtiene después de un proceso de temple en aceite o, incluso, al aire. Después del temple en aceite, la estructura del acero es martensita con aproximadamente 10-20 % de carburos, en dependencia de las condiciones de enfriamiento, que proporcionan durezas superiores a los 50 HRC.

La composición química estándar de este material (ASTM A297), es la que sigue: 0,35-0,5 % C; 12-14 % Cr; ≥ 1 % Ni; $\geq 0,7$ % Ti; $\geq 0,8$ % Si; $\geq 0,8$ % Mn; $\geq 0,04$ % P y 0,04 % S.

Como se observa, los elementos principales de esta aleación son el cromo y el carbono. El cromo hace al acero muy resistente a la corrosión y, en presencia del carbono, forma carburos especiales de estequiometría $M_{23}C_6$ que coagulan más despacio que la cementita y le confieren dureza adicional al acero.

La temperatura de temple es de 1050-1100 °C y la temperatura de revenido se selecciona en dependencia de la dureza que se desee. La máxima dureza se alcanza para revenidos inferiores a los 200 °C (Guliaev, 1983).

La elevada temperatura de temple obedece al alto contenido de carbono que contiene el acero, de manera que con ella se garantiza la total solubilización de los carburos para que la transformación martensítica ocurra a plenitud (Guliaev, 1983). Este acero posee pequeñas cantidades de níquel o titanio con el objetivo de afinar el grano y mejorar las propiedades de dureza.(Guliaev, 1983).

2.3. Metodología empleada

Para dar cumplimiento al objetivo planteado y confirmar la hipótesis establecida en correspondencia con las tareas de trabajo, se procedió a desarrollar el plan experimental siguiente:

1. Análisis de las causas que determinan el desgaste de los impelentes
2. Obtención de muestras fundidas de acero AISI 420
3. Análisis químico de las muestras
4. Tratamiento térmico de las muestras
5. Análisis microestructural
6. Evaluación de la resistencia al desgaste de muestras tratadas térmicamente y en estado de fundición
7. Obtención de impelentes de la aleación AISI 420

Tabla 4. Pérdida de elementos según el equipo para la fusión (%)

Tipo de horno	Cr	Al	Mg
Horno de reverbero	2 - 3	1 - 2	2 - 3
Horno eléctrico y de crisol	4 - 5	1 - 2	3 - 5

En este caso, se seleccionan los elementos que contiene el acero a obtener, según el epígrafe 2.2.

Una vez calculada la carga, se procedió a la selección de la materia prima, la que se reporta en la Tabla 5.

Tabla 5. Composición de la carga

Materia Prima	Cantidad (kg)
Ferrocromo	380
Ferrosilicio	10
Ferromanganeso	10
Chatarra de acero	580

2.5.2. Fusión de la carga

La fusión se realizó en un horno de inducción ICHT-6 con revestimiento ácido de 1 t de capacidad. Antes de realizar la colada, se tomaron muestras del metal líquido para verificar que su composición arrojara un metal fundido con química similar a la deseada.

Después de verificada la composición química del metal fundido, se corrige la composición con el ferrosilicio necesario. La temperatura del baño líquido se controló con un pirómetro óptico SPECTROSPORT JR. Se utilizaron cajas de moldeo con mezcla en verde con la composición mostrada en la Tabla 6.

Tabla 6. Materiales de la mezcla de moldeo.

Materia Prima	Cantidad (%)
Bentonita	7
Melaza	1
Agua	5
Arena sílice	87

2.6. Análisis químico de las muestras

Se comprobó la composición química de las muestras para verificarlas con los estándares y establecer su correspondencia con la aleación a investigar. El análisis químico se realizó empleando un Espectrómetro de Masa ESPECTROLAB 230 con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón.

2.7. Tratamiento térmico de las muestras

Se seleccionaron tres muestras replicadas cada una para someterlas a tratamiento térmico doble de temple en aceite y revenido bajo. En la Tabla 7 se muestran los parámetros de los tratamientos térmicos aplicados.

Tabla 7. Parámetros de los parámetros de los tratamientos térmicos aplicados a las muestras

Parámetros	Temple	Revenido
Temperatura de calentamiento (°C)	1055	200
Tiempo de permanencia (min)	10	30
Medio de enfriamiento	Aceite	Aire tranquilo

En el enfriamiento durante el temple las probetas se agitaron intensamente para mejorar las condiciones de transferencia de calor al aceite y evitar que este se inflamara por el contacto con la pieza caliente.

Se tomaron, además, tres muestras más en estado de fundición con sus respectivas réplicas para someterlas a ensayos de dureza y análisis microscópico.

2.8. Preparación de muestras metalográficas

Las operaciones de clasificación, preparación y pulido de las muestras se realizaron siguiendo la siguiente secuencia de operaciones. (Kehl, 1964):

1. Fresado: El alisado de las superficies se realizó en una Fresadora Universal modelo 6T12-1 con refrigeración continua.

2. Rectificado: Se aplicó rectificado en dos caras aproximadamente paralelas en una Máquina Rectificadora Horizontal 6T-82-1 con refrigeración continua. Se designó una de las caras para el pulido y ataque y la otra para el análisis químico.
3. Pulido: Se utilizó una Pulidora Metalográfica modelo Rathenow-43 empleando papel abrasivo de las series 350, 500, 600 y 800, paños de fieltro y una solución de pasta abrasiva de diamante con granulometría de 3 μm .
4. Limpieza, lavado y secado: Después de la adecuada preparación de las superficies, las probetas se lavan con acetona para eliminar restos de grasa, polvo y pasta de pulir cuidando no frotar la superficie pulida. Posteriormente se limpian con etanol absoluto para eliminar cualquier vestigio de humedad.
5. Ataque de las superficies a investigar: Inmediatamente después de la limpieza, se procedió a realizar el ataque de las superficies a investigar. Se emplearon las técnicas de ataque manual por inmersión según ASTM E262-Practice A. El tiempo de ataque fue de 5 segundos en Nital al 2 %.
6. Limpieza y secado: Después de atacadas las superficies de las muestras, se lavan con agua destilada y posteriormente en alcohol para finalmente secarlas en aire caliente.

2.9. Comprobación de la dureza

Se realizaron ensayos de dureza según lo especificado por la norma ASTM E 92 y de microdureza siguiendo las especificaciones de las normas NC 10-56:86 y ASTM E 384-89. Se empleó un durómetro Rockwell Tokwel con penetrador de diamante en forma de cono y un microdurómetro AKASHI aplicando cargas de 300 g con penetrador piramidal de diamante, totalizándose 3 mediciones en cada zona.

2.10. Análisis microestructural

Los análisis microestructurales se realizaron siguiendo lo indicado por las normas NC 10-55:86 y NC 10-56:86 y ASTM E 3-95. La microestructura resultante de la aleación tratada térmicamente y en estado de fundición se analizó empleando un microscopio

óptico OLYMPUS AX70 con cámara fotográfica SONY (DXC-107/107P, 12 V CC) acoplada. Se emplearon combinaciones de objetivos y oculares para obtener magnificaciones de imágenes de 100 X a 1000 X. Se determinó el tamaño del grano metálico según las normas NC 10-57:86 y ASTM E112, y Kucher (1987), Malichev et al (1975).

2.11. Evaluación de la resistencia al desgaste de la aleación

La resistencia al desgaste se evaluó por el método gravimétrico y la pérdida de peso se determinó utilizando la expresión 16 (Caraballo, 2002 y 2004):

$$PP = G_i - G_f \quad (16)$$

Donde:

PP – Pérdida de peso por desgaste abrasivo gravimétrico (g)

G_i – Peso Inicial de la pieza (g)

G_f – Peso final (g)

Se sometieron muestras tratadas térmicamente y en estado de fundición a ensayos de desgaste abrasivo según las Normas NC 04-79: 87 y ASTM: G 65-94. Se utilizó una instalación para ensayos de desgaste abrasivo disponible en el DCIS de Nicaro (figura 1), con tiempos de prueba de 1 h.

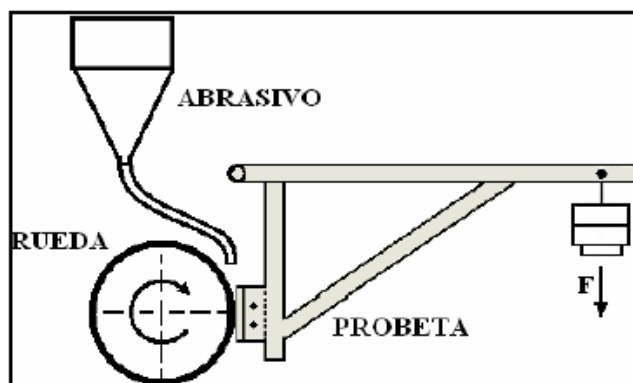


Figura 1. Esquema de la instalación para la realización de los ensayos de abrasión según norma ASTM G-65.

El motor de la instalación tiene una potencia nominal de 1,75 kw y velocidad nominal de 1660 rev/min y una transmisión por poleas que reduce la velocidad angular hasta las (200 ± 10) rev/min establecidas por ASTM G-65. La máquina cuenta con una rueda vulcanizada acoplada al árbol de la polea, sobre la que se suministra el abrasivo con un flujo entre 300 y 400 g/min, con un valor promedio de 350 g/min. Como material abrasivo se utilizó polvo de mineral reducido seco con una granulometría de 75 μm (figura 2).



Figura 2. Muestra de mineral reducido seco utilizado en los ensayos de desgaste

Las muestras a analizar se pesaron previamente en una balanza digital SARTORIUS, con una precisión de 0,01 mg (0,0001 g). Antes de comenzar la prueba, se garantizó un suministro de una cortina uniforme de arena. La estabilidad de suministro de la arena se garantizó por la sección de salida de la boquilla seleccionada. Para evitar discontinuidad en el suministro, debe procuró que la boquilla escogida no se encontrara obstruida o con cualquier defecto que modifique el área de salida del mineral. En total se utilizaron 25 kg de arena.

2.12. Análisis estadístico

Los datos obtenidos de los ensayos de desgaste se procesaron utilizando el software Tierra para obtener una función de correlación entre la pérdida de peso y el tiempo de operación. Se empleó el método de los mínimos cuadrados, con la correspondiente prueba de bondad de ajuste del modelo.

El análisis de regresión se realizó teniendo en cuenta los siguientes pasos, (Masón y Lind, 1994).

2.12.1. Representación gráfica de los datos: Se emplearon diagramas de dispersión, ubicándose los datos en un sistema de coordenadas cartesianas, asumiendo la pérdida de peso como variable independiente y el tiempo de ensayo como variable dependiente. (Spigel, 1986 y Bluman1995).

2. 12 .3. Determinación de la ecuación de regresión: Se probaron funciones tipo para escoger el modelo que presente mejor ajuste, y proporcione una adecuada descripción física del problema según el fenómeno manifestado.

2.12.4. Formulación de la hipótesis estadística: La idoneidad del modelo para la predicción de valores de durabilidad de los impelentes se establece a través de la prueba de significancia del coeficiente de correlación mediante la prueba “t de student”. En este caso, se comprueba si el valor del coeficiente de correlación de la muestra “r”, se debe a una relación significativa entre las variables o si es producto de la casualidad, sobre la base del planteamiento de la hipótesis:

$$H_0: \rho = 0$$

$$H_1: \rho \neq 0$$

Donde:

H_0 = Hipótesis nula

H_1 = Hipótesis alterna

ρ = Coeficiente de correlación de la población.

2.12.5. Búsqueda del valor crítico: El valor $t_{\text{Crít}}$ se selecciona por tablas para un nivel de significación $\alpha = 0.05$ y $v = N - 2$ grados de libertad.

2.12.6. Cálculo del valor de prueba: El valor de prueba t se calcula (Spiegel, 1986; Mason et al. 1994; Bluman, 1995) por la ecuación:

Conclusiones del capítulo

1. Se propone el acero AISI 420 como nuevo material en sustitución del Ni20Cr27 que presenta una estructura estable a temperatura después de temple en aceite o al aire compuesta por martensita con aproximadamente 10-20 % de carburos de gran dureza que pudiera proporcionar buena resistencia al desgaste en las condiciones de operación de los turboaeradores analizados.
2. Las propiedades a investigar se fundamentan a partir de la necesidad de describir y caracterizar el objeto de estudio para definir las principales regularidades que determinan un comportamiento adecuado del material propuesto.
3. Los métodos de investigación propuestos se complementan con el empleo de una base experimental y tecnologías para el análisis que garantizan precisión y confiabilidad en los resultados.

CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

3.1. Introducción

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

Con la introducción de este nuevo material el AISI 420 (4X13) los que tienen una probada calidad, sus propiedades físicas, químicas y mecánicas proporcionan las cualidades necesarias para garantizar un funcionamiento fiable y con las garantías de una larga duración de vida útil, una mejoría sustancial en los indicadores económicos de esta área y la empresa en sentido general.

El objetivo del capítulo: Realizar una valoración de los resultados, el comportamiento de los indicadores económicos y sociales, en la planta de lixiviación de la empresa René Ramos Latour de Nicaro, explicar los fundamentos científicos de la solución al problema planteado a partir de la interpretación de las regularidades observadas, durante la etapa de estudio enmarcada en un año y medio.

Análisis de las causas que determinan el desgaste de los impelentes

Durante la etapa de estudio se lograron determinar que las principales causas del desgaste de los impelentes, la constituyen:

1. La abrasividad de las partículas de mineral a lixiviar y ya lixiviado
2. Arenamiento en los turboaeradores
3. Efecto corrosivo de la mezcla carbonato–amoniacal
4. Baja dureza de los materiales utilizados anteriormente.

Abrasividad de las partículas de mineral a lixiviar y ya lixiviado

Se conoce que la materia prima mineral está compuesta, fundamentalmente, de óxidos de Fe (goethita, hematita y maghemita) y cantidades subordinadas de

hidróxidos de Al (gibbsite) y Mn (asbolanas), además de componentes silicatados como cuarzo, olivino y serpentina (Rojas et al, 1993, Rojas y Turro, 2003).

Según Rojas et al (1993), cuando estas fases minerales se someten a un régimen de reducción de alta temperatura (alrededor de 720 °C a 820 °C) para obtener hierro y níquel metálicos, el componente ferroso puede dar lugar a la formación de la solución sólida maghemita-magnetita, la que posteriormente, al pasar a los turboaeradores, puede oxidarse y originar la fase maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) conjuntamente con la magnetita ($\text{Fe-Fe}_2\text{O}_4$) y óxidos de aluminio (Al_2O_3).

Como fases minerales secundarias en las colas de las etapas de lixiviación y recuperación de amoníaco, aparecen las fases de silicatos de Fe y Mg fayalita [$(\text{Fe, Mg})_2\text{SiO}_4$], del tipo fayalita magnesiánica, que representan alrededor del 12 % en las muestras. No se descarta la presencia de cierta cantidad de donathita [$(\text{Fe, Mg})(\text{Cr, Fe})_2\text{O}_4$] como fase isoestructural de las espinelas cromíferas. También se reportan contenidos de cuarzo por la presencia de hasta 12 % de SiO_2 . Vera (2001) muestra un resumen de las principales fases minerales por horizonte en el perfil laterítico en los yacimientos de Moa y extrapola esta composición mineralógica para los yacimientos de Nicaro y Pinares de Mayarí, por lo que a los efectos de la presente investigación, se toman las constituciones anteriormente reportadas como válidas para la fábrica René Ramos Latour.

Caraballo (2002 y 2004). Expresa, de estas fases mineralógicas, se conoce que el cuarzo (SiO_2) posee dureza de 7 en la escala de Mohs (de 9, como máximo), mientras que la de la maghemita (Fe_2O_3) es de 6. Otras fases como la magnesio-cromita ($(\text{Mg, Fe})\text{Cr}_2\text{O}_3$) y la magnetita ($\text{Fe-Fe}_2\text{O}_4$) poseen durezas de 6-7; mientras que la del óxido de aluminio III (Al_2O_3) es 9.

La figura 3 muestra fotografías tomadas a algunas de las partículas que fueron aisladas de la muestra de mineral utilizada (figura 2) en los experimentos. Como se observa, las mismas tienen formas irregulares, angulosas, con bordes aguzados y afilados. La combinación de estas relativamente moderadas (en unos casos) y elevadas (en otros) durezas con la morfología de las partículas les confieren a las mismas una gran abrasividad, la que se incrementa con los efectos de la agitación

del medio provocada por el movimiento de giro de las paletas. En este caso, se pone de manifiesto un mecanismo de desgaste microestructural similar al descrito por Villca (1992) y sistematizado por Mariño (2000).

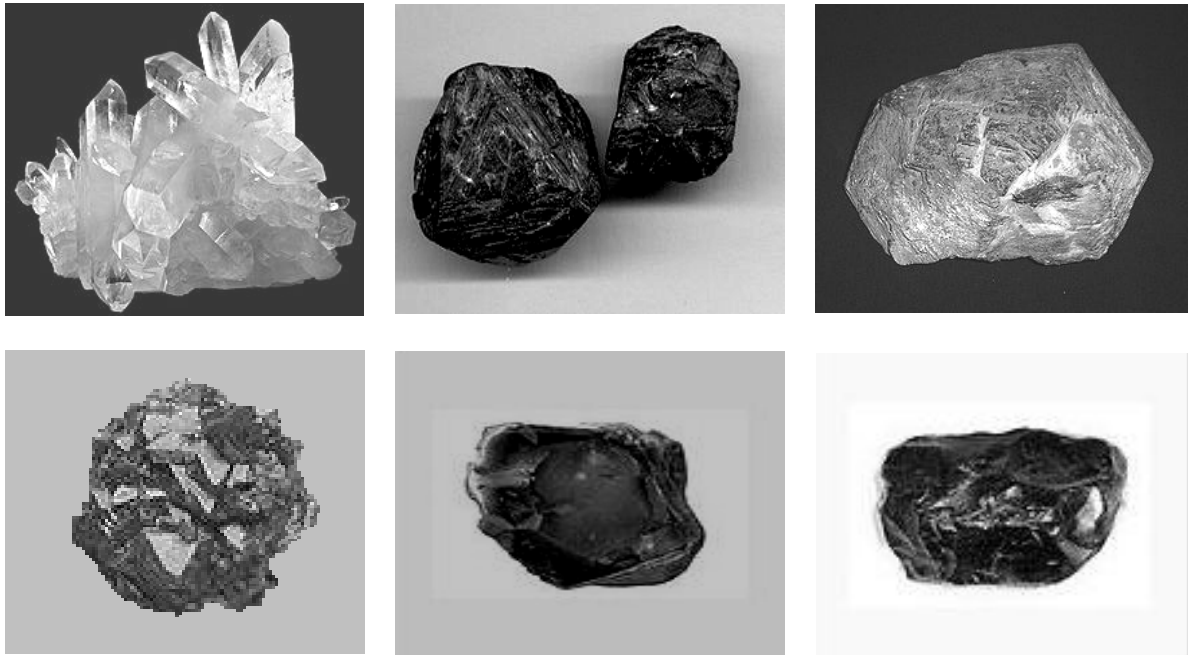


Figura 3. Morfología de algunas de las micropartículas que componen la muestra de mineral analizado (X 100)

En este caso, se considera que las partículas en suspensión inciden sobre los defectos superficiales medibles o asperezas de la superficie de las paletas y, debido a que la dureza de las partículas es superior a la de los defectos, ejercen un efecto de “rayado” y arrastran o desprenden partículas de material de la superficie.

En un primer instante, ocurre la destrucción mecánica de las asperezas, que son despuntadas hasta un aumento de la superficie real de contacto y hay un reparto suficiente y regular de la carga. Luego de la destrucción mecánica de las asperezas siempre habrá cizalladura. Se trata de un deterioro mecánico debido a las interacciones atómicas o moleculares, en la que sólo hay que cortar una transferencia de metal de molécula a molécula.

Durante este proceso las tensiones de cizalladura, producen deslizamiento o ruptura en el interior de los granos cristalinos y crean tensiones de cizalladura que alcanzan un valor máximo en algún punto que originan la fractura de la micropartículas. Durante el deslizamiento de las partículas sobre la superficie se produce arrastre y acumulación de material delante de las asperezas y como consecuencia, aumenta el área de contacto hasta el deterioro total de la superficie, sin regeneración posible, lo que hace inservible la pieza.

3.2.2. Resultados del comportamiento del arenamiento

Cuando el suministro de aire se encuentra por debajo del especificado, las partículas de mineral en suspensión se pueden sedimentar y entonces ocurre el llamado “efecto de arenamiento”. Como resultado, el material precipita al fondo de los turboaeradores y se compacta bajo la acción de la carga hidráulica. En la figura 4 se exhiben dos muestras de arena lixiviada donde se puede apreciar la existencia de granos de tamaño grande, formados en el interior de los turbos, que hacen el medio mucho más agresivo.

Esta irregularidad, aún cuando constituye una deficiencia en el proceso tecnológico, conlleva a que el desgaste de las paletas se acelera, pues el sistema no se chequea hasta que ocurra una avería o parada para mantenimiento.



Figura 4. Conglomerados de partículas de mineral lixiviado

Se realizó un monitoreo sistemático al comportamiento del arenamiento. El periodo de estudio comenzó en Diciembre del 2007 hasta Julio del 2009, abarcó todos los

turboaeradores de la planta de lixiviación y cobalto de la Empresa "René Ramos Latour", con una frecuencia de medición semanal (tabla 1).

Tabla 6. Comportamiento del arenamiento en los turbos que componen cada serie (altura de capas de arena, mm)

Turbos	Serie A	Serie B	Serie C	Serie N	Serie S
99	96.01	69.34	904.24	-	-
100	189.2	223.5	302.01	328.42	876.3
101	991.62	1655.06	1638.3	292.84	781.05
102	1781.8	884.94	851.66	759.21	149.61
103	765.05	810.77	800.86	851.57	554.23
107	913.4	1471.17	1536.95	177.8	554.23
108	2037.6	620.78	1318.01	395.48	289.81
109	215.14	535.18	425.96	124.21	167.64
113	2754.88	2216.15	-	84.33	341.88
114	659.38	979.93	-	285.75	328.42
115	1097.03	1576.83	-	43.43	209.04

En todos los casos en que el nivel de arena formado por los óxidos metálicos, sea superior a los 760 mm, el impelente se mueve dentro de las partículas sedimentadas y, al entrar en contacto con las mismas, se acelera el deterioro de los mismos por los efectos de la abrasión.

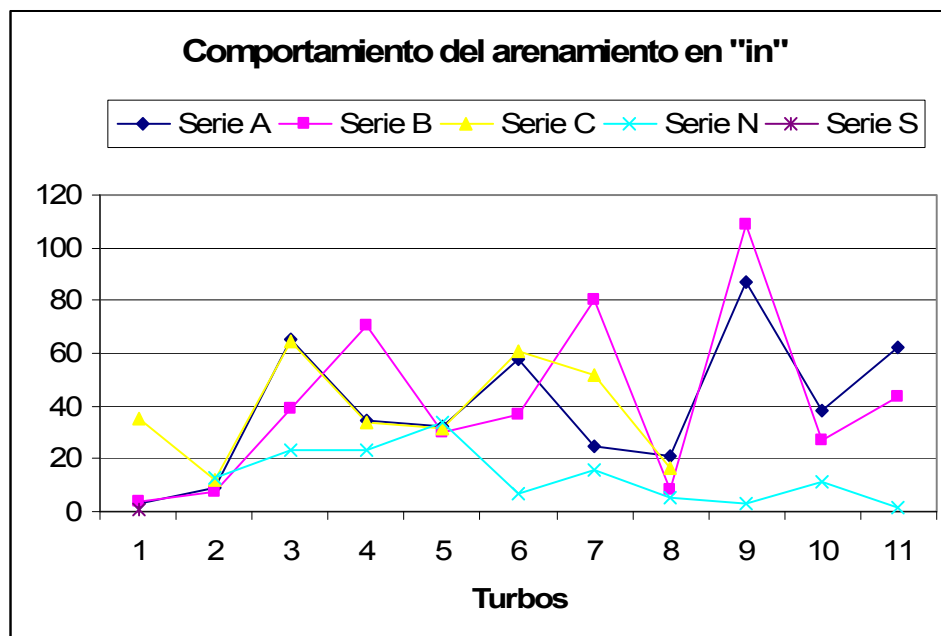


Figura 5. Comportamiento del arenamiento durante la etapa de estudio

Lectura:

- Punto 1 - Turbo 99 en la serie A, B y C.
- Punto 2 - Turbo 100 en las series A, B, C, N y S.
- Punto 3 - Turbo 101 en las series A, B, C, N y S.
- Punto 4 - Turbo 102 en las series A, B, C, N y S.
- Punto 5 - Turbo 103 en las series A, B, C, N y S.
- Punto 6 - Turbo 107 en las series A, B, C, N y S.
- Punto 7 - Turbo 108 en las series A, B, C, N y S.
- Punto 8 - Turbo 109 en las series A, B, C, N y S.
- Punto 9 - Turbo 113 en las series A, B, N y S.
- Punto 10 - Turbo 114 en las series A, B, N y S.
- Punto 11 - Turbo 115 en las series A, B, N y S

3.2.3. Efecto corrosivo de la mezcla carbonato–amoniaco

Las soluciones amoniacoales constituyen un agente moderadamente corrosivo para diferentes tipos de aleaciones; pero cuando a la misma se le incrementan los niveles de oxígeno, la agresividad se incrementa, fenómeno que se pone de manifiesto en los turboaeradores.

Al llegar a los turboaeradores, la pulpa obtenida en las canales de contacto como resultado de la mezcla de mineral con la solución carbonato-amoniaco, se le provee aire con el objetivo de suministrar el oxígeno requerido para la lixiviación y provocar la turbulencia de la pulpa.

El oxígeno del aire suministrado origina reacciones de oxidación que, en presencia del amoniaco, atacan la superficie metálica de los elementos agitadores e incrementan la corrosividad del medio.

3.2.4. Baja dureza de los materiales utilizados anteriormente

Como se apuntó anteriormente, según el proyecto inicial de la fábrica, los impelentes se fabricaban de aleación ASTM -106-A; posteriormente se probaron la aleación ASTM –A515, el hierro gris fundido del tipo 18-36, el acero estructural del tipo CT-3 (Norma GOST) y finalmente la aleación X27H20 (Norma GOST).

Todos estos materiales pertenecen a la gama de materiales no endurecibles por tratamiento térmico, cuya dureza no excede los 30 HRC; por lo que la probabilidad de obtener microestructuras que garanticen la suficiente dureza solamente se reduce a la ejecución de procesos de deformación en frío para los materiales ASTM -106-A; ASTM -A515, el acero estructural del tipo CT-3 y la aleación X27H20. El hierro gris, por su elevada fragilidad, no se somete a procesos de deformación en frío.

3.3. Análisis químico de las muestras

La composición química de las muestras analizadas según el promedio de tres análisis en puntos diferentes, estuvo dentro del rango establecido para la aleación, de acuerdo con las especificaciones de ASTM A297 (Wegst, 1995). Como se muestra en las tablas 7 y 8.

Tabla 7. Composición química del acero AISI 420 (ASTM A297)

% C	% Cr	% Si	% Mn	% P	% S	Otros
0.35-0.45	12-14	≤ 1	≤ 1	≤ 0.003	≤ 0.003	0.8 Ni o Ti

Tabla 8. Composición química de las muestras

% C	% Cr	% Si	% Mn	% P	% S	Ni
0.45	13.29	0.74	0.88	0.0020	0.0027	0.39

Como se puede apreciar, el por ciento de carbono se encuentra en el rango establecido, lo que beneficia la obtención de un grano más fino y favorece además la dureza, el resto de los componentes se encuentran dentro de los rangos establecidos en la norma.

3.4. Comprobación de la dureza

Existe una relación directa entre los valores de microdureza de los carburos, fases sigma, granos metálicos y las propiedades mecánicas resultantes. La dureza de las muestras en estado de fundición y después de ser tratadas térmicamente fue de 52 HRC y 56 HRC respectivamente. Estos valores de dureza son propicios para un buen comportamiento al desgaste, cuestión que se corroboró en los ensayos.

3.5. Análisis microestructural

En las Figuras 6 y 7 se muestran las micrografías típicas de la microestructura del material en los estados fundidos y de tratamiento térmico. La micrografía de las figuras 6 muestra una estructura dendrítica, típica de los materiales fundidos. El tamaño de grano en este caso, es 6. La micrografía de la figura 7 revelan las franjas de carburo en el borde de los granos con una estructura martensítica en el interior del grano.

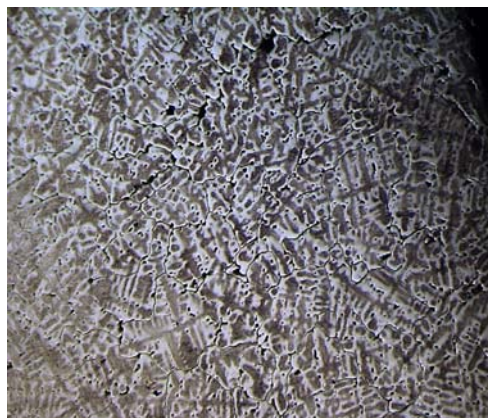
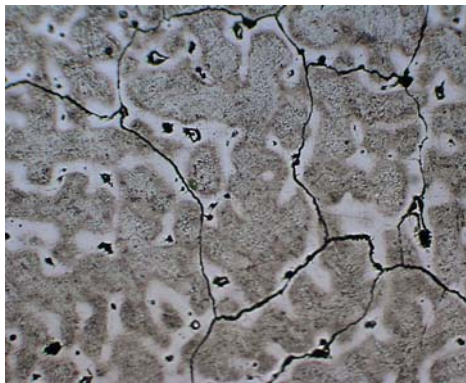
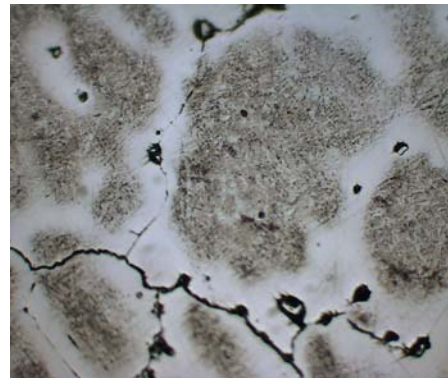


Figura 6. Estructura de la aleación en estado de fundición x 40



a)



b)

Figura 7. Microestructura de la aleación después del tratamiento térmico. a) X 200 b) X 400

En el caso del acero AISI 420, el alto contenido de cromo que es un elemento formador de carburo, reduce la temperatura de transformación martensítica

umentando así la cantidad de austenita residual. La transformación austenita–martensita se origina en forma de lámina martensítica.

La formación de dendritas es característica de las fundiciones, y se deben al crecimiento lateral de los cristales surgiendo así el cristal arborescente; llamado dendrita (Guliaev (1983).

A juzgar por la microestructura de la Figura 7, la aleación es propensa a temple aún para las bajas velocidades de enfriamiento durante la fundición. Se determinó el tamaño del grano metálico según las normas NC 10-57:86 y ASTM E112.

La transformación martensítica la distinguen dos peculiaridades de otros cambios de fase Guliaev (1983):

1. Inexistencia de difusión en la composición de fases inicial y final es la misma, durante la transformación ocurre nada más la reestructuración de la red.
2. La nueva fase está orientada de modo regular con respecto a la antigua (Austenita) por lo que el carácter de esta transformación ocasiona relieve en la superficie.

Las transformaciones que satisfagan las dos condiciones son llamadas martensíticas.

3.6. Evaluación de la resistencia al desgaste de la aleación

El desgaste abrasivo de los equipos agitadores de pulpa carbonato amoniacal en el proceso de obtención del níquel, se caracteriza por la adherencia molecular, entonces presenta como resultados, múltiples rasguños y cortes del metal, ocasionado por las partículas más duras del abrasivo que compone la mezcla de fase mineralógica (níquel, cobalto, magnesio, hierro y otros). De esta forma se deduce que los componentes de los equipos empleados en el proceso, interaccionan con un gran número de partículas abrasivas, por lo tanto deben estar contruidos con un material de gran resistencia a la abrasión como el AISI 420.

La tabla 9 muestra los resultados del análisis gravimétrico utilizando la fórmula (2) para los estados de fundición y con temple a 1010 °C y revenidos entre 150 °C y 550 °C.

Tabla 9. Resultados del análisis gravimétrico

N/O	Historial	Dureza (HRC)	ΔP en g
1	Estado de fundición (sin TT)	52	0,0137
	Temple a 1100 °C y revenido a:		
2	150 °C	58	0,0040
3	200 °C	56	0,0062
4	250 °C	54	0,0122
5	300 °C	52	0,0137
6	350 °C	48	0,0180
7	400 °C	50	0,0289
8	450 °C	51	0,0388
9	500 °C	33	0,0392
10	550 °C	32	0,0428

Como era de esperar, la pérdida de peso disminuye a medida que se incrementa la dureza del material. Se puede observar que la dureza del material en estado de fundición es equivalente a la dureza del mismo para proceso de temple a 1100 °C y revenido a: 300 °C, con una pérdida de peso de aproximadamente 0.037 g en una hora. En la figura 8 se grafica el comportamiento de la pérdida de peso ΔP registrada en los ensayos en función de la dureza del material.

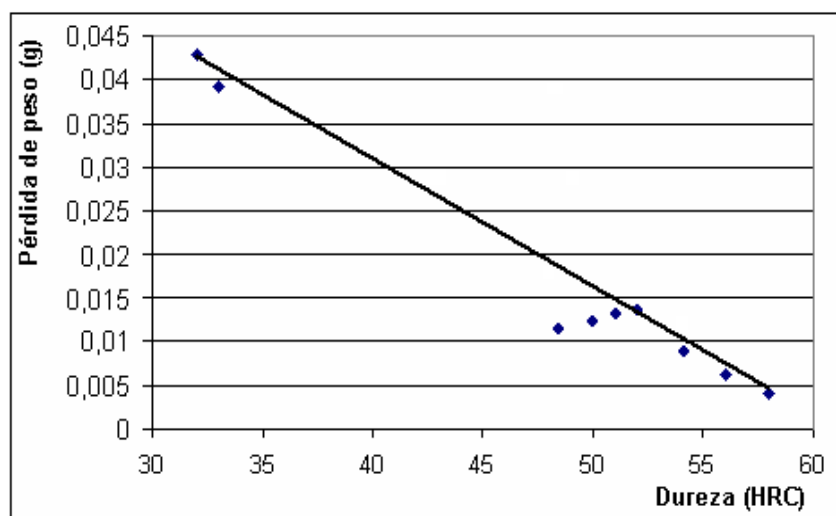


Figura 8. Pérdida de peso de las probetas en función de la dureza del material

En el rango entre 350 °C y 450° C, se observa un ligero incremento de la dureza que se atribuye al fenómeno de fragilidad de revenido de segundo género característica de ciertas aleaciones mezcladas con cromo y/o molibdeno. En este caso, el incremento de la dureza se asocia a la precipitación de fases de carburos secundarios que incrementan la resistencia del material. Para el análisis estadístico de los valores de pérdida de peso de las probetas en función de la dureza del material, se obviaron los puntos 5, 6, 7 y 8, toda vez que los mismos no se consideran desviaciones atribuidas a errores en las mediciones; sino como se apuntó anteriormente, obedecen a un comportamiento metalúrgico-físico del material en cuestión. La curva de la figura 8 se ajusta a la recta de la ecuación (4):

$$\Delta P = 0,0888 - 0,0015(\text{HRC}) \quad R^2 = 0,9982. (4)$$

En la tabla 6 se muestran los resultados del análisis estadístico para el ajuste del modelo de la ecuación (4).

Tabla 6. Resultados del análisis estadístico para el ajuste del modelo de la ecuación (4)

Determinante de la matriz del sistema	12000
Determinante normalizado del sistema	2.43×10^{-3}
Error máximo a resolver por el sistema	0.99×10^{-11}
Variación explicada	1.32
Grados de libertad	1
Variación residual	0.015
Grados de libertad	8
Variación Total	1.17
Grados de libertad	9
Error estándar de una estimación	0.063
Error probable de una observación	0.038
Coefficiente de correlación r	0.9982
Para una prueba t de Student con nivel de confianza 0,95	
Intervalo de confianza de r	[0.9978;0.9987]
Para una prueba F de Ficher con nivel de confianza 0,95	
F calculado (Fc) para el ajuste	407.77
F tabulado (Ft) para el ajuste	5.78
El ajuste es estadísticamente significativo ya que $F_c > F_t$	
Prueba para los coeficientes del modelo (0,95)	
Valor teórico t de Student, $t_{\text{Trab}} = 2.0151$	
Valor de prueba t de Student, $t_{\text{Ind}} = 20.19$	
El coeficiente del término independiente es significativo ya que $t_{\text{Trab}} < t_{\text{Ind}}$	

Como se observa, el modelo se adecua a una recta con una bondad de ajuste elevada (0,99). Los valores de los estadígrafos t de Student y F de Fisher calculados en comparación con los tabulados sugieren un ajuste y coeficientes del modelo significativos.

A tenor de los resultados de la evaluación de la resistencia al desgaste de la aleación bajo las condiciones ensayadas y en virtud de que los resultados experimentales descritos a través del modelo son estadísticamente significativos, se puede asegurar que la variabilidad de la disminución de la pérdida de peso del material queda explicada por el incremento de la dureza del mismo, lo que valida la selección de la aleación AISI 420 como material adecuado para la fabricación de las paletas de los agitadores de los turboaeradores analizados.

3.7. Validación de la resistencia al desgaste de la aleación a escala industrial

A manera de validación de los resultados a escala de laboratorio, en el mes de Junio de 2009 se fundieron 4 agitadores con acero AISI 420 y después del control de la calidad, se sometieron a explotación a partir del mes de julio.

Considerando que la elevada dureza que alcanzó el material en estado de fundición (51,5 HRC), se decidió someter los elementos a explotación sin aplicarles tratamiento térmico. Se les dio seguimiento a través de los correspondientes planes de mantenimiento, monitoreando el peso de los mismos a medida que se sometían a procesos de revisión. La tabla 7 muestra los resultados del monitoreo realizado en 450 días.

Tabla 7. Peso de los impelentes para diferentes tiempos de explotación

t (días)	Peso (kg)
0	148
30	147,91
90	147,84
180	147,66
300	147,43
360	147,35
450	147,1

Aún cuando las mediciones se tomaron para uno solo de los elementos montados, los tres restantes presentaron comportamiento similar en cuanto al aspecto exterior. Los espesores de paletas y demás dimensiones fueron similares, por lo que los análisis que aquí se vierten son aplicables a los cuatro elementos analizados.

La disminución del peso total de los elementos fue de 0,9 kg. Si reconsidera que los agitadores poseen 6 paletas (ubicadas a 60° cada una) y asumiendo que el desgaste ocurrió solamente en las paletas, entonces cada paleta perdió 0,15 kg en los 450 días analizados, que representan 0,33 g/día y 0,138 g/h, similar a los 0,0137 g perdidos en los ensayos.

Aún cuando la máxima dureza y resistencia al desgaste se alcanzan cuando el material es tratado térmicamente, hay que considerar que el el tratamiento térmico encarece la tecnología de obtención de los impelentes por los altos costos en que se incurren por concepto de energía. No obstante, para las condiciones analizadas, estos valores de pérdida de peso se consideran adecuados, toda vez que las configuraciones de las paletas al cabo de los 450 días se mantuvieron prácticamente invariables, como se observa en la figura 9.



Figura 9. Comportamiento del desgaste en los impelentes después de 540 días de trabajo

De la tabla 3 se observa que, si bien existe una diferencia de 5 HRC en los valores de dureza de las muestras sin tratamiento térmico (estado de fundición) y con tratamiento térmico, para el caso en que las muestras no han sido tratadas térmicamente la pérdida de peso presenta valores ínfimos, de alrededor de 0,011 y 0,014 g diarios para un promedio de 0,0125 g.

La elevada dureza y resistencia al desgaste, en este caso, se garantizan en estado de fundición gracias a la presencia combinada de martensita con los carburos. En tal sentido, la microestructura y durezas obtenidas en estado de fundición satisfacen los requerimientos de diseño y justifican la no realización de tratamiento térmico para el caso analizado.

3.8. Efecto económico y social

Los agitadores de estos equipos son de gran volumen, con un diámetro de 1225 mm con un costo unitario de \$3325.94 en moneda nacional y \$1972.64 en CUC. Se realizó un estudio que abarcó los años (2007, 2008 y 2009), periodo durante el cual se efectuaron un gran volumen de cambios de impelentes a causa del desgaste por abrasión.

Las consecuencias de las paradas imprevistas, aunque acarrear problemas serios en la estabilidad de la producción, generalmente se resuelven en períodos de tiempo relativamente largos, los atrasos son imposibles de recuperar. Finalmente, la producción se incumple y su situación económica empeora.

En la tabla 8 aparece el comportamiento de los cambios de impelentes a causas del desgaste por abrasión, se acentúa en el año 2007, se dan a conocer además los costos durante este periodo de análisis y los posibles ahorros con la introducción de los impelentes construidos con el nuevo material acero AISI 420.

Tabla 8. Gastos por concepto de cambio de impelentes

Año	Cantidad de impelentes cambiados	Costo en MN	Costo en CUC
2007	88	\$292 682.72	\$173 592.32
2008	44	\$146 341.36	\$86 796.16
2009	48	\$159 645.60	\$94 686.70
Promedio 3 años	60	\$199 556. 40	\$118 358. 40
Con AISI 420	5	\$16 629. 70	\$9 663. 20
Posible ahorro en relación con el 2009	-	\$143 015.90	\$85 023. 50

3.8.1 Otras causas que intervienen en las roturas de los impelentes

causas que propician el deterioro de los indicadores económicos de la planta de lixiviación y a la fábrica como tal, durante un proceso de observación realizada al área justamente en momento de desmontaje de los turbos, se comprobó que un porcentaje alto (45.5%) durante la extracción de los impelentes son dañados por mala operación, invalidándolos para su uso posterior. Las principales dificultades que se originan son:

1. Rotura del cubo de los impelentes por la aplicación de cargas laterales de gran magnitud, con una grúa de 50tn, estos impelentes por la imposibilidad de maquinado se construyen con un núcleo incrustado debilitándose el espesor de la parte fundida; por lo que no soporta altas cargas laterales.
2. Rotura de las paletas o el disco por las mismas causas.
3. Rotura del disco o las paletas con la retroexcavadora que agarra durante el proceso de extracción de la arena.
4. Rotura del conducto de suministro de aire al turbo.

3.9. Comportamiento del medio ambiente en el área de lixiviación.

En la planta de lixiviación y cobalto de la empresa René Ramos Latour de Nicaro el nivel de contaminación es elevado, si se tienen en cuenta los rangos de comportamiento de los gases amoniacales, en las áreas circundantes a cada equipo del proceso de lixiviado. A partir de las consideraciones siguientes:

La contaminación por los gases de amoníaco se mide en parte por millón, lo que representa para soluciones líquidas: 1 ppm = 1 mg/L, es decir, una parte por millón (1ppm) equivale a un miligramo de soluto por 1Kg de solución líquida (1×10^{-6} g/g). En una solución gaseosa: 1 ppm = 1 cm³/m³, entonces una parte por millón (1ppm) equivale a un centímetro cúbico de soluto por un metro cúbico de mezcla gaseosa (1×10^{-6} cm³/cm³).

A continuación aparece la tabla 8 en la que se contemplan los valores dentro de cuyos rangos puede moverse el hombre. Estas cifras son relativas, pues todos los seres humanos no poseen la misma resistencia ni el mismo comportamiento ante la aparición de los gases de amoníaco.

Tabla 11. Contenido de amoníaco en la atmósfera circundante

Menor de 50 ppm	Imperceptible al olfato
Entre 50 y 100 ppm	Sensación olfativa (mínima tolerable)
Entre 100 y 500 ppm	Tolerancia máxima por períodos largos a tolerancia mínima por períodos cortos de acuerdo con los extremos del rango.
Más de 500 ppm	Irritaciones cutáneas, mucosas y garganta, con peligro de paros respiratorios

En el área de lixiviación el contenido de gases de amoníaco es relativo, en la mayor parte de los casos se encuentra cercano a las 100 ppm y en muchos de los casos superior, uno de los factores que contribuyen a una mayor afectación al medio ambiente lo representa el vertimiento de material contaminado durante el proceso de extracción de los impelentes; por cuya acción salen cantidades apreciables de mezcla y se derraman directamente al suelo, además de la exposición directa del personal de mantenimiento a los gases de amoníaco y parte del líquido.

Es necesario destacar también que ese material extraído se pierde y por efecto de las lluvias va hacia el ecosistema costero. Provoca afectaciones igualmente a la economía de la empresa y el país.

Conclusiones del capítulo III

1. La elevada dureza y resistencia al desgaste del acero AISI 420 se garantiza en estado de fundición gracias a la combinación de la martensita con los carburos.
2. Las observaciones metalográficas permitieron comprobar la existencia de martensita, lo que justifica la existencia de gran dureza en el acero AISI 420 y la resistencia al desgaste por abrasión.
3. La presencia de alto contenido de carbono, propicia la dureza y por tanto la resistencia al desgaste, su ubicación alrededor de los cristales y la formación de carburos; beneficia directamente la dureza de la aleación.
4. El uso del acero AISI 420 resulta económicamente factible, pues se alarga el tiempo de vida de los impelentes de los turboaeradores de la planta de lixiviación y cobalto lo que económicamente representa un ahorro.
5. Desde el punto de vista social y ambiental se reducen los riesgos de contaminación, pues la extracción de los impelentes va acompañada de la emisión al medio ambiente de gases tóxicos y amoníaco, los que se esparcen por las áreas de la planta de lixiviación con destino final al mar por arrastre de las lluvias.

Conclusiones generales

1. Se establecieron las regularidades en el comportamiento mecánico de los impelentes de los turboaeradores de la fábrica de Nicaro, a partir del empleo del acero de alta resistencia AISI 420 así como la prolongación de su vida útil. Las observaciones metalográficas permitieron comprobar la existencia de martensita, lo que justifica la presencia de gran dureza del acero AISI 420 y la resistencia al desgaste por abrasión.
2. La existencia de alto contenido de carbono propicia la dureza y por tanto la resistencia al desgaste, su ubicación alrededor de los cristales y la formación de carburos; beneficia directamente la dureza de la aleación.
3. No se ejecutan las operaciones de mantenimiento inmediatamente que ocurre un problema, la demora (de hasta 15 días), posibilita una mayor compactación de la mezcla lo que hace más difícil la extracción de los impelentes, y esto se traduce en roturas además de prolongar el tiempo de mantenimiento.
4. El gasto por concepto de consumo de impelentes por concepto de desgaste en el 2009, fue de \$159 645. 60 en MN y \$94 686. 70 en CUC, con la utilización del acero AISI 420 se pueden reducir los gastos a \$16 629. 70 en MN y \$9 663. 20 en CUC.
5. Dentro y fuera de la planta el nivel de contaminación es elevado, dado por la emanación de gases tóxicos productos del amoníaco como el CO₂ y el NO₂ que causan graves afectaciones al medio ambiente. La emisión de materiales contaminantes es elevado por excesivos mantenimientos.

Recomendaciones

1. Generalizar el empleo del acero de alta resistencia para la construcción de los impelentes en todos los turbos en explotación, por lo que representa para la economía de la planta y la empresa.
2. Dar seguimiento a la operación de desmonte de los turbos cuando ocurren fallas por caída de ejes o por arenamiento, evitar la aplicación de fuerza lateral con la grúa; para evitar el deterioro del cubo del agitador ocasionando la invalidez y por tanto la sustitución del impelente. Dar seguimiento a la explotación máxima de los impelentes que se extraen de los turboaeradores, que en muchos de los casos están a más de un 90% de vida y son sustituidos por uno nuevo, elevando de esta forma los gastos de mantenimiento de la planta y la empresa.
3. Utilizar las arandelas de presión para la fijación de los ejes de los turbos aeradores para eliminar de esta forma la caída de los mismos y reducir de esta forma la frecuencia de mantenimiento.
4. Adoptar medidas que permitan reducir las afectaciones al medio ambiente, que incluya acciones organizativas y técnicas para minimizar las implicaciones los daños al ecosistema costero en sentido general; incluyendo además capacitación acorde a los riesgos medioambientales.

Bibliografía:

1. ASTM E 3-95. Preparation of Metallographic Specimens.
2. ASTM A 297. Analysis chemical.
3. ASTM G. 65 – 94 Wear abrasive.
4. ASTM E 3841 – 89 Surface Wear - Analysis, Treatment.
5. ASTM A 2 – 97 Composition chemical of steel.
6. ASTM E 92. Harness Testing.
7. ASTM E112. Determination of Grain Size of Steels.
8. Bluman, A. G (1995). Elementary Statistics. A Step by Step Approach. Dubuque: Brown Communications, Inc.
9. Bring Coello Silvestre. (1979). Metales teoría y práctica: Editorial Oriente. Santiago de Cuba.
10. Calister, W. (1994). Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. Editorial Reverté, S. A.
11. Caraballo M. A. (2002). Investigación sobre el endurecimiento mediante explosivos, del acero al manganeso empleado en los equipos de laboreo minero. Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa,
12. Caraballo M. A. (2004). Endurecimiento mediante explosivos del acero Hadfield. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa,
13. Díaz Charles E. (2008). Trabajo de diploma Diseño del accionamiento de los turboaeradores de la planta de lixiviación y lavado. Empresa Cdte Ernesto Che Guevara. Moa.
14. Dobrovolski V., Zablonki K. et al. (1976). Elementos de máquinas pp. 54. Editorial MIR Moscú.
15. Elioizishvili M. y Cabezas G. (1979). Producción de metales y aleaciones no Ferrosas. Editorial Pueblo y Educación.
16. Fonareu, S.F. y Jhonson, V. A. (1981). “Propiedades Anti Fricción de los Aceros Inoxidables que trabajan sin Lubricación”, Trenye e Iznos.

17. Frómata F., Kovtun C. (1982). Reparación de las piezas típicas de las máquinas herramientas. Editorial científico técnica Ministerio de Cultura. Ciudad de la Habana.
18. Ganguly A., Choudki B. L. et al. (2007). Heat treatment of AISI- 420 grade martensitic stainless steel. Baltimore Convention Center. Baltimore. Maryland USA.
19. García – Poggio J. A. (1965). Aceros de alta resistencia. Editorial Montecorvo. Madrid.
20. García A. (1997). Resumen en cuanto a modificación de Impelentes. Empresa Cdte René Ramos Latour. Nicaro.
21. Guliaev A. P. (1983). Metalografía Tomo I y II pp. Editorial Mir Moscú,
22. Hernández Sampedro R., Fernández C., Batista P. (1998). Metodología de la investigación Editorial Mc Grau –Hill.
23. Jum (66, 90, 98, 2000). Informe técnico sobre turboaeradores de la planta de lixiviación y cobalto de la Empresa René Ramos Latour. Nicaro.
24. Kasatkin A. G. (1978). Operaciones básicas en la tecnología química Tomo I. Kudrin V. A: Metalurgia del acero. Editorial Mir. Moscú.
25. Kehl G. L. (1964). Fundamentos de la práctica metalúrgica. Aguilar, S.A. Edición Madrid.
26. Kucher A. (1987). Tecnología de metales. Editorial Mir Moscú.
27. López E. (1992). Análisis comparativo de las operaciones con los turbos 104, 99C, 99B. Empresa René Ramos Latour. Nicaro.
28. López Ferrer F. A. (1966). Manual práctico de máquinas y aparatos en los Ingenios de azúcar de caña. Editorial Pueblo y Educación.
29. Malichev A.; Nikolaiev G.; Shuvalov Y. (1975). Tecnología de los metales. Editorial Mir Moscú.
30. Martínez y Rojas. (2007). Estudio experimental de las características reológicas, granulométricas y superficiales de pulpas industriales en la planta de lixiviación Cdte. René Ramos Latour. U.O. Santiago de Cuba.
31. Mason, R. D.; Lind D. A. y W. G. (1994). Marshal: Statistics an introduction. Four Edition, Orlando: The Dryden Press.

32. NC 10-55:86. Metalografía. Microfotografías. Escala de las Imágenes.
33. NC 10-56:86. Metalografía. Microestructura de Metales de aleaciones duras.
Métodos de ensayo.
34. NC 10-57:86. Metalografía. Determinación del Tamaño del grano en los Metales.
Métodos de Ensayo.
35. NC 04 – 79. Ensayo gravimétrico.
36. Ordóñez U, et al. (2004). Tecnología de los metales y aleaciones. Editorial Félix Varela.
37. Otero J. (1992). Modificación de los turboaeradores de la planta de lixiviación y lavado en búsqueda de la optimización y análisis comparativo con los turbos de greenvale. Informe Técnico, Empresa Cdte. “Ernesto Che Guevara”, Moa.
38. Reinoza, R. (2001). “Comportamiento de los Aceros Inoxidables Ante Solicitudes Combinadas Mecánico-Corrosivas”, Tesis Dr. Ciencias Técnicas, I.S.P.J.A.E, La Habana, Cuba.
39. Rodríguez M. (1986). Informe preliminar de los nuevos turbo Aeradores de la planta de lixiviación y lavado. Empresa René Ramos Latour. Nicaro.
40. Rodríguez M. (1986). Resumen del trabajo de evaluación de los turbo Aeradores Empresa René Ramos Latour. Nicaro.
41. Rodriguez R. (1991). Desarrollo de turbo aeradores Empresa René Ramos Latour. Nicaro.
42. Rojas, A. y A. Turro, (2003): Mineralogical composition of tailings from Caron process in Moa, Holguin, Cuba. Minería y Geología Nos. 3-4: 21-28.
43. Rojas, A., M. Fernández, A. Lapin. (1993). “Valoración mineralógica del material procesado en la empresa Ernesto Guevara”, Minería y Geología, 10 (2): 55-59.
44. Sevrykov N., Kusmin B. (1986). Chelishchev y General Mmetallurgy. Peace. Publicities. Moscú.
45. Spiegel, M. R. (1986). Teoría y problemas de estadísticas 875 problemas resueltos, C. Habana: Edición Revolucionaria, Octava Reimpresión.

46. Suev V. (1982). Trabajos de laboratorios para la capacitación de termitas. Editorial Mir - Moscú.
47. Turro A. (2002). Estudio del hidrotransporte de las colas en el proceso carbonato Amoniacal. ISMM de Moa. Cuba.
48. Velázquez, A. (2002). Fragilización de la aleación HH por precipitación de la fase sigma. Tesis presentada en opción al título de doctor en ciencias técnicas. Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez". Facultad de Metalurgia y Electromecánica.
49. Vera, L. O, (2001). Procedimiento para la determinación de las redes racionales de exploración de los yacimientos lateríticos de níquel y cobalto en la región de Moa. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Facultad de Geología y Minas, Departamento de Geología.
50. Vian A, Acón J.(1987). Elementos de ingeniería química. Editorial Pueblo y Educación.
51. Willians J. A. (2005). Wear and wear particles – some Fundamentals. Tribology International.
52. Zum Gahr, K. H. (1987). "Microstructure and Wear of Materials", Tribology Series, 10, Elseviere, Ámsterdam.