



INSTITUTO SUPERIOR MINERO
METALÚRGICO DE MOA
Dr. Antonio Núñez Jiménez

FACULTAD METALURGIA ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**Tecnología de recuperación con el empleo de un
casquillo y control de parámetros de los rodillos
radiales**

AUTOR: José Antonio García Bourricaudi

TUTOR (es): Ms. C. Benigno Leyva De la cruz
Dr. C. Isnel Rodríguez González

Moa, 2016

“Año 58 de la Revolución”

DECLARACIÓN DE AUTORIA

Yo: José Antonio García Bourricaudi

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

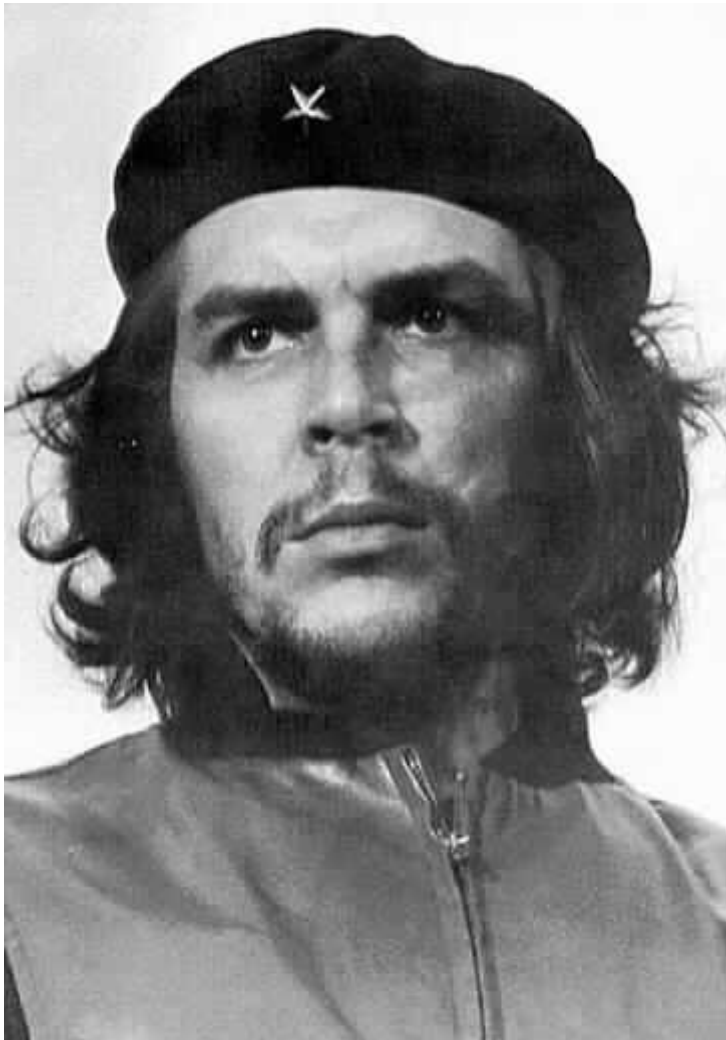
José Antonio García Bourricaudi

Dr.C. Isnel Rodríguez González

Ms.C. Benigno Leyva De la cruz

PENSAMIENTOS

...El conocimiento nos hace responsables."



*"Nuestro sacrificio es
consciente; cuota para
pagar la libertad que
construimos."*

*La preparación del ingeniero debe asegurar la elevación de la
productividad del trabajo, el mejoramiento de la calidad de la
producción y la reducción del precio de costo en todas las fábricas del
Ministerio de Industria.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, por su total entrega para poder llegar a ser un profesional, a mi mujer por estar a cada minuto a mi lado y saberme comprender todo el tiempo, a mi padre biológico que aunque no esté presente siempre me ha apoyado y ha inculcado en mí buenos valores, a mi hermana Laritza y a mis abuelos.

Agradezco a la revolución porque sin ella no hubiera sido posible el sueño de estudiar la carrera de Ingeniería Mecánica.

Agradezco a mis tutores Benigno e Isnel que nunca dudaron de que yo fuera capaz de realizar dicho trabajo.

Agradezco al profesor Ramón porque gracias a su buena voluntad de ayudarme pude continuar mis estudios en el instituto.

Agradezco a los compañeros que trabajan en la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” por brindarme todo su apoyo en la realización de la Tesis, en especial a mi tío Herminio.

Agradezco a todos mis compañeros de aula que estuvieron ahí cuando los necesité y a todos lo que me brindaron su amistad.

**A TODOS
MUCHAS GRACIAS**

DEDICATORIA

Dedico esta Tesis en especial a mi madre Vivian, a mi padre Pedro Enrique y a mi mujer Lisebel por todo el apoyo que me brindaron, por creer en mí cuando otras personas me dieron la espalda, por estar en los momentos difíciles por los que tuve que pasar.

A mis abuelos por su amor y dulzura.

Y a papá Dios por hacer que todo esto fuera posible.

SÍNTESIS

En el presente trabajo se determinó el ajuste por interferencia, el material adecuado y la tecnología para la recuperación de rodillos de transportadores sinfín, con la utilización de casquillos. Se desarrolló la simulación para comprobar la resistencia mecánica de la unión propuesta, se verificaron, además, los parámetros de control. Se obtuvo, como resultados principales, un ajuste móvil con juego, según el sistema de eje único; se infiere que el casquillo, elaborado de acero AISI 321, soportará los esfuerzos a los que estará sometido. Se realizó el cálculo de los cordones de soldadura, con electrodo E 309 L-16, para garantizar la unión del casquillo con el rodillo; se demostró que resulta más factible, desde el punto de vista económico, recuperar los rodillos desgastados que fabricarlos nuevos, puesto que la recuperación propuesta arroja un monto de efectivo igual a \$ 505,74, mientras que en la fabricación se invierten cifras de \$ 3 204,01 y \$ 7 188,46 para la obtención por laminado y fundición respectivamente.

SYNTHESIS

Presently work the adjustment by interference, the appropriate material and the technology for recovering of rollers of the screw conveyors, with the use of cases, was determined. The simulation, by finite element modeling method, was developed to check the mechanical resistance of the proposed union, it was verified, also, the control parameters. It was obtained, as main results, a mobile adjustment, according to the unique axis system; it is inferred that the case, elaborated of steel AISI 321, will supports the efforts to those that it will be subjected. The calculation of the welding cords, with electrode E 309 L-16, to guarantee the union, of the case with the roller, was carried out; it was demonstrated that it is more feasible, from the economical point of view, to recover the worn away rollers than to manufacture it new, since the proposed recovery throws an amount of \$505,74, while in the production are invested figures of \$3 204,01 and \$7 188,46 for the obtaining, by lamination and casting, respectively.

ÍNDICE	Pág.
Introducción	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	
1.1. Introducción	6
1.2. Transportadores de tornillo sinfín	6
1.2.1. Generalidades de los transportadores sinfín	7
1.3. Revisión bibliográfica sobre rodillos radiales de transportadores sinfín	7
1.4. Influencia del desgaste sobre los elementos de máquinas	10
1.5. Características de los cojinetes empleados en las máquinas	14
1.5.1. Deterioro de los cojinetes de contacto plano	15
1.6. Influencia de la exactitud en construcción de maquinaria	15
1.7. Simulación con el empleo del método de elementos finitos	16
1.7.1. Etapas del método de elementos finitos	17
1.8. Características de los materiales para elaboración mecánica de piezas	17
1.8.1. Empleo de los aceros inoxidables para la fabricación de piezas	18
1.9. Procesos tecnológicos para la elaboración de elementos de máquinas	19
1.9.1. Soldadura con arco y metal protegido	20
1.9.1.1. Establecimiento de la tecnología de soldadura	21
1.9.2. Mecanizado de piezas	21
1.10. Métodos estadísticos	23
1.10.1. Métodos estadísticos en el control de la calidad	24
1.11. Conclusiones del capítulo 1	24

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción	25
2.2. Características de los rodillos radiales del transportador Jacobi	25
2.2.1. Características del régimen de explotación de los rodillos radiales	26
2.3. Composición química de materiales utilizados	27
2.3.1. Composición química del material del casquillo	27
2.3.2. Características de los electrodos	28
2.4. Máquinas y útiles	28
2.4.1. Máquina para soldar	28
2.4.2. Torno universal 1 M 63	29
2.4.2.1. Cuchilla para el maquinado	30
2.5. Instrumentos de medición utilizados	30
2.5.1. Características del micrómetro	30
2.5.2. Pie de rey para realizar mediciones	31
2.5.3. Durómetro para realizar las mediciones de dureza	31
2.6. Determinación de los parámetros del ajuste	32
2.7. Simulación con el método de elementos finitos del conjunto casquillo-rodillo	34
2.8. Procedimiento para la elaboración de la tecnología de recuperación	35
2.8.1. Determinación de los parámetros del proceso de soldadura	36
2.8.1.1. Cálculo del contenido de ferrita	37
2.8.1.2. Cálculo de la cantidad de electrodos	38

2.8.1.4. Determinación de la intensidad máxima de corriente	39
2.8.1.5. Tensión eléctrica del arco de soldadura	40
2.8.1.6. Tiempo total para ejecutar la soldadura	40
2.8.1.7. Determinación de los gastos de tiempo de trabajo	41
2.8.2. Determinación de los parámetros del proceso de maquinado	42
2.8.2.1. Velocidad de corte	43
2.8.2.2. Profundidad de corte	43
2.8.2.3. Avance	44
2.8.2.4. Cantidad de pasadas	44
2.9. Procedimiento para la elaboración del resultado de las mediciones	45
2.9.1. Muestreo aleatorio simple	45
2.9.2. Aseguramiento de la normalidad	45
2.9.3. Prueba de hipótesis estadística relativa a dos medias	47
2.10. Análisis económico	47
2.11. Conclusiones del capítulo 2	49
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
3.1. Introducción	50
3.2. Determinación de los parámetros del ajuste entre el casquillo y el rodillo	50
3.3. Análisis de la resistencia mecánica del casquillo	52
3.3.1. Chequeo del diseño sobre la base del factor de seguridad	55
3.4. Determinación de los parámetros de la tecnología de soldadura	55
3.5. Tecnología de maquinado para la recuperación del rodillo	58

3.6. Evaluación de los parámetros de control del rodillo y del casquillo	62
3.7. Valoración económica	63
3.8. Efectos ambientales	66
3.8.1. Calentamiento en los procesos de soldadura	66
3.8.2. Afectaciones de los procesos de soldadura	67
3.8.3. Afectaciones de los procesos de maquinado	68
3.9. Conclusiones del capítulo 3	69
CONCLUSIONES GENERALES	70
RECOMENDACIONES	72
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

El incremento de la eficiencia de los equipos e instalaciones que constituyen las fábricas productoras del níquel es una prioridad de los dirigentes de dichas entidades y del estado cubano, debido entre otros factores, a que en los últimos años la industria del níquel ha tenido un rol importante en la economía del país, constituyendo uno de los renglones que más divisas aporta a la economía cubana.

La fábrica productora de concentrados de níquel “Comandante Ernesto Che Guevara” se encuentra ubicada al norte del yacimiento de mineral en Punta Gorda, provincia de Holguín entre los ríos Moa y Yagrumaje, a 4 km de la Ciudad de Moa y a 2 km del pueblo de Punta Gorda. En esta región se ubica una de las mayores reservas minerales de níquel del mundo, aspecto que ha funcionado como inductor de un gran desarrollo socioeconómico local y regional.

La Unidad Básica de Producción “Hornos de Reducción” tiene como función la reducción de los óxidos de níquel y cobalto y se considera entre las de mayor influencia en la finalidad del proceso, ya que la producción del sínter depende directamente de la magnitud del extractable logrado durante la reducción del mineral.

El objetivo del proceso que se realiza en la Unidad Básica Productiva “Hornos de Reducción” es reducir el óxido de níquel a níquel metálico, haciéndolo apto para la lixiviación amoniacal. Para ello se cuenta con la instalación de 24 hornos de reducción, 12 transportadores sinfín que, a su vez, para su funcionamiento, utilizan 12 rodillos radiales de apoyo cada uno. Estos rodillos, para mantener el rendimiento y la estabilidad en el trabajo, deben tener un acabado óptimo, sin grietas ni fisuras en toda la superficie de la pista de rodaje además de buena resistencia mecánica a la fricción y compresión (Oliveros, 2011).

Uno de los problemas medulares que afecta la productividad de la planta de hornos de reducción y a la empresa en general, es el deterioro frecuente de los rodillos. Según las estadísticas compiladas, el índice promedio de deterioro es de 52 rodillos al mes, lo que representa un promedio de 624 rodillos anualmente (Oliveros, 2011).

Debido a la frecuente salida de servicio, por desgaste, se hace necesario sustituirlos de forma prematura, provocando pérdidas y afectaciones en la producción.

Teniendo en cuenta lo anterior, se plantea la siguiente **situación problemática**:

- Las afectaciones ambientales provocadas por los ruidos, vibraciones, derrame de polvo, grasa y el sobreconsumo de materia prima y energía.
- Se ha determinado que los rodillos radiales pertenecientes al transportador sinfín de minerales lateríticos de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, en los últimos tiempos, se fabrican de barras laminadas de acero AISI 1045 (Oliveros, 2011 y Prieto, 2013), lo que provoca un sobreconsumo de materia prima.
- Limitaciones en el sistema de lubricación de los cojinetes, debido a que no se asegura el conducto para el engrase (Oliveros, 2011), lo que ocasiona una disminución de la longevidad de los rodamientos.
- La estructura metalográfica que presenta el material de los rodillos después de retirado no es la típica del temple, es del tipo perlita (Oliveros, 2011 y Prieto, 2013), lo que conlleva a suponer que no se le aplica tratamiento térmico de temple+revenido o que se produce una transformación, en el material, producto al régimen de trabajo al que están expuesto.
- La disminución significativa de la dureza superficial de los rodillos durante el período de explotación (Prieto, 2013; Leyva, 2014a y Poll, 2014), lo que provoca una aceleración de los mecanismos del desgaste.
- La influencia de factores aleatorios en la fluctuaciones de la cantidad de rodillos retirados (Prieto, 2013 y Leyva, 2014b), lo que provoca la necesidad de un análisis integral de las causas que provocan la salida de servicio de estos.

A partir de la situación problemática definida anteriormente se plantea el siguiente **problema a investigar**:

La necesidad de determinar un ajuste entre un casquillo exterior y el rodillo, el material adecuado y la tecnología para la recuperación de rodillos desgastados, de

los transportadores sinfín para minerales lateríticos, de la Unidad Básica Productiva “Hornos de Reducción” en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

El **objeto de la investigación** para este trabajo se establece:

Los rodillos radiales del transportador Jacobi de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

A partir del problema de la investigación planteado se define como **objetivo del trabajo**:

Determinar el ajuste, material adecuado y la propuesta de una tecnología para la recuperación de rodillos radiales del transportador sinfín, para materiales lateríticos, de la Unidad Básica Productiva “Hornos de Reducción” en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

El **campo de acción** de este trabajo lo constituye:

Diseño y procesos tecnológicos de elaboración de piezas.

Sobre la base del problema planteado y los objetivos definidos se establece la siguiente **hipótesis**:

Si se selecciona el ajuste, material adecuado para la elaboración del casquillo y se proyecta una tecnología para recuperación, será posible restablecer los parámetros de trabajo los rodillos radiales en el transportador sinfín, para materiales lateríticos, de la Unidad Básica Productiva “Hornos de Reducción” en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Y se definen los siguientes **objetivos específicos**:

1. Proponer el ajuste y material adecuado para la recuperación de los rodillos radiales del transportador sinfín.
2. Desarrollar la tecnología de recuperación de rodillos radiales averiados.
3. Desarrollar la modelación y simulación, por el método de elementos finitos, del conjunto casquillo-rodillo propuesto para la recuperación de los rodillos radiales del transportador sinfín.

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

1. Revisión bibliográfica y sistematización del estado del arte sobre el desgaste de rodillos radiales de transportadores sinfín.
2. Selección del ajuste y el material adecuado que garantice resistencia para la elaboración de un casquillo externo.
3. Propuesta y desarrollo de una tecnología para la recuperación de rodillos averiados, utilizando un casquillo exterior.
4. Realización del control de parámetros fundamentales de rodillos recuperados con el empleo de casquillo.
5. Modelación y simulación, por el método de elementos finitos, del conjunto casquillo-rodillo propuesto.
6. Valoración de los resultados y planteamientos de los efectos económicos y ambientales relativos al proceso de recuperación de los rodillos desgastados.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.1. Introducción

En la Empresa Productora de Níquel “Comandante Ernesto Che Guevara” el mineral pasa por diferentes procesos en diferentes plantas. La UBP de “Hornos de Reducción” tiene una importancia vital dentro del proceso de obtención de concentrados de níquel, es la misma donde se crean las condiciones (reducción de los óxidos de níquel y cobalto) para la extracción del mineral en su forma metálica. La planta de Hornos de Reducción, según Rodríguez (2006), está compuesta por cilindros metálicos verticales de 15 m de altura revestidos en su interior con ladrillos refractarios y en su exterior con una carcasa metálica, sistemas de alimentación, barrido, descarga y cámaras de combustión. Los hornos están provistos de 17 hogares o soleras en forma de bóvedas esféricas, con un total de 24 hornos agrupados en tres lozas de 8 hornos cada una. La homogenización y arrastre de la carga dentro de los hornos se garantiza con un sistema de 68 brazos acoplados a un árbol central hueco. 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. El diagrama de flujo de la instalación se muestra en el anexo 1.

Otro componente estructural de la Planta de Horno de reducción son las cámaras de combustión, que están equipadas con quemadores del tipo PRIOR que se disponen en los diferentes hogares, a razón de dos cámaras en cada hogar ubicadas simétricamente. El mineral, una vez reducido, sale por el hogar hasta los transportadores sinfín llamados Jacobi y se traslada a los enfriadores para posteriormente ser sometidos a lixiviación.

Estos aditamentos llamados transportadores sinfín, encargados de transportar el mineral mediante un movimiento circular a razón de 27,7 rev/min expuesto a temperatura en el orden de los 650 – 700 °C hasta el próximo proceso, para su funcionamiento necesitan de un sistema de rodillos radiales de apoyo capaces de

soportar una carga de aproximadamente 37 258,82 N, donde facilitan y mantienen la rotación para evitar sedimentación en la superficie de transportación (Prieto, 2013).

La determinación y descripción de los factores responsables de las fallas de un componente, mecanismo o estructura, brindan una valiosa información para mejorar tanto el diseño, los procedimientos operativos y el uso de los componentes, como para evitar paradas de línea o pérdidas de producción en la industria.

En el presente capítulo se establece como **objetivo:** Realizar una revisión bibliográfica para mostrar fundamentos teóricos que sirvan de base a la propuesta de recuperación de los rodillos radiales, desgastados, del transportador Jacobi, con el empleo de un casquillo, para la UBP “Horno de Reducción” de la Empresa Productora de Níquel “Comandante Ernesto Che Guevara”.

1.2. Transportadores de tornillo sinfín

Los transportadores de tornillo sinfín (figura 1.1) son máquinas de transporte continuo con el órgano de tracción rígido, se emplean para la manipulación de residuos orgánicos en el tratamiento de aguas, transporte de sólidos en infinidad de industrias, teniendo aplicaciones de toda índole. Este equipo está diseñado para realizar el transporte de material mediante una espiral basado en el principio de Arquímedes. Tienen la posibilidad de trabajar en diferentes ángulos desde la horizontal hasta la vertical (Anuriev, 1982).



Figura 1.1. Transportador de tornillo sinfín.

Fuente: Anuriev (1982).

1.2.1. Generalidades de los transportadores sinfín

De acuerdo con Guerra (1988), son equipos los cuales se diseñan según necesidades: tipo de material a transportar, inclinación, caudal a transportar o velocidad de traslación de los materiales. Según el uso que se le quiera dar estos se fabricarán de diferentes formas y materiales, cambiando su geometría, tanto estructural como la espiral. Tienen infinidad de combinaciones con lo que le da la capacidad de adaptarse a cualquier tipo de proceso, pudiendo combinar la posición de la tolva de carga, boca de salida, grupo de accionamiento y posición de trabajo.

1.2.2. Principio de funcionamiento de los transportadores sinfín

El transportador se pone en funcionamiento a través del sistema motor que consta de un reductor que le suministra el movimiento al tornillo sinfín de alas helicoidales el cual va montado en cojinetes y chumaceras, en dependencia de la longitud del mismo hasta 50 m como máximo, tendrá cojinetes intermedios que funcionarán como puntos de apoyo para evitar flexiones o la distorsión de la espiral. La carga se realizará por un extremo en la parte superior y la descarga se realizará por la parte inferior del otro extremo.

1.3. Revisión bibliográfica sobre rodillos radiales de transportadores sinfín

Batista (2007), efectuó una evaluación de la tecnología de fabricación por fundición de los rodillos del transportador Jacobi fabricado de material Ac 55Г, según la norma GOST, debido a la aparición de los rechupes (cavidades de contracción) en el proceso de solidificación de los mismos. El mencionado autor elaboró la tecnología de moldeo y la compara con el proceso de fabricación que se utiliza en el taller de fundición de la Empresa Mecánica del Níquel “Gustavo Machín Hoed de Beche”. El mismo realiza la simulación por el método de elementos finitos, para visualizar el proceso de solidificación de la pieza.

Rodríguez (2008) realiza un análisis del proceso de solidificación de la llanta y el rodillo del transportador rotatorio Jacobi fabricados de acero 55 Г según la norma GOST, en los cuales después del proceso de fundición se observan defectos por

cavidades de contracción. La autora finalmente muestra anexos, tablas, dibujos, esquemas y otros aspectos que posibilitan un mejor entendimiento de la temática tratada, así como una valoración económica y ambiental.

Oliveros (2011), hace referencia al desgaste de los rodillos radiales de apoyo en el transportador sinfín Jacobi. Plantea que una de las causas que provoca el desgaste prematuro de estos es la variación de la composición química del material, el que no se corresponde con el establecido en los planos de diseño. Además se comprobó la poca resistencia al desgaste superficial, no se mostró la presencia de martensita como resultado del tratamiento térmico en el acero, es decir, no se le dio ningún tipo de tratamiento térmico a estos rodillos, asimismo no realiza el análisis de fiabilidad ni del comportamiento de la dureza y el desgaste de estos elementos, utilizando pruebas estadísticas que permitan identificar la significación que representan dichas variaciones.

Prieto (2013), realiza la caracterización de las fallas de los rodillos radiales del transportador Jacobi de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Obtiene que el comportamiento de las fallas de los rodillos durante el período que abarca de enero del 2010 a marzo del 2013 permitió plantear que las variaciones observadas se deben a factores de índoles aleatorios al nivel de confianza del 95 %, y la medida de la tendencia en base a la media móvil es de 9 rodillos por mes; el diámetro y la dureza disminuyen en un 1,5 % y un 11,4 % respectivamente; los rodillos se fabrican de acero AISI 1045 con estructura ferrita + perlita, y poseen buena fiabilidad.

Leyva (2013), efectúa la verificación de la rugosidad superficial obtenida en la fabricación de los rodillos del transportador Jacobi de la Empresa Productora de Níquel “Comandante Ernesto Che Guevara”. Se determina por medio de un micrómetro de exteriores, con rango de medición de 300 a 400 mm y una apreciación de 0,01 mm, el diámetro exterior de 24 rodillos y se infiere el valor de la rugosidad superficial con el empleo de un modelo matemático definido previamente. La aplicación del procedimiento ofreció como resultado fundamental que los 24 rodillos

muestreados en la etapa final del proceso de fabricación, pueden ser aceptados, sobre la base del diámetro exterior con un riesgo del proveedor del 65 %.

Sánchez (2014), realiza un análisis del proceso de fabricación de los rodillos radiales del transportador rotatorio Jacobi y examina la variante de utilizar acero 40X en su elaboración. Se hace el análisis de los principales parámetros de la tecnología de fabricación por fundición, maquinado y tratamiento térmico, teniendo en cuenta los factores relacionados con la contracción. Para una mejor comprensión y visualización de todo el proceso de fabricación, se muestran anexos, tablas, esquemas, gráficos y curvas características del proceso de fabricación. Finalmente se realiza la valoración económica y ambiental.

Poll (2014), analizó el comportamiento de la dureza superficial, de los rodillos radiales en el transportador Jacobi, antes y después de la puesta en explotación. Los resultados obtenidos indican que la dureza disminuye significativamente en un 10,5 %; el análisis de la estructura metalográfica permitió determinar la relación entre la variación de la dureza y la estructura metalográfica.

Pérez (2015), realizó una investigación sobre las afectaciones que se producen debido al desgaste de los rodillos radiales del transportador Jacobi de la Empresa Productora de Níquel “Comandante Ernesto Che Guevara”. Para el cumplimiento del propósito midió el diámetro de los rodillos con un micrómetro de exteriores antes y después de la puesta en explotación. Se determinó que los rodillos están presentando un nivel de desgaste significativo al nivel de confianza del 95 %, el cual oscila en el rango de 1,575 mm a 1,89 mm.

En los trabajos mencionados anteriormente se aprecia que se han tratado de construir rodillos con calidad, considerando la variante de fundición cuando los mismos son fabricados de acero 55 Г (según la norma GOST) y se han determinado los aspectos que llevan a la retirada prematura de servicio de estos; pero en ninguno de ellos se considera la recuperación de los rodillos desgastados con el empleo de un casquillo exterior.

1.4. Influencia del desgaste sobre los elementos de máquinas

El desgaste es el daño de la superficie por remoción de material de una o ambas superficies sólidas en movimiento relativo. Es un proceso en el cual las capas superficiales de un sólido se rompen o se desprenden de la superficie. Al igual que la fricción, el desgaste no es solamente una propiedad del material, es una respuesta íntegra del sistema (Caubet, 1971; Verdeja, 1996).

El desgaste metálico y abrasivo están caracterizados 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 (Martínez, 1981).

Se plantea que los aceros con una alta cantidad de austenita retenida presentan una considerable resistencia al desgaste en masa abrasiva. La mejor estructura, desde el punto de vista de la resistencia al desgaste abrasivo es la martensítica o bainítica, fortalecida en su matriz (Guliaev, 1983).

El fenómeno de fricción y mecanismo de desgaste puede explicarse por la formación y posterior ruptura de uniones existentes entre dos superficies que están en contacto, ya que todas las superficies presentan algún grado de rugosidad. Así la fricción tiene una naturaleza molecular-mecánica que depende de las fuerzas de interacción molecular, de las propiedades mecánicas del material, de la deformación plástica y de la configuración geométrica de los elementos de contacto (Escanaverino, 1986).

En el contacto de cuerpos sólidos, además de la mecánica es necesario tener en cuenta la interacción molecular de los materiales en las superficies de separación y en las fuerzas superficiales. Como estos procesos dependen de la naturaleza física y química de las superficies en contacto, es necesario describir las correspondientes características de estas superficies (Johnson y Bower, 1989).

Al investigar el desgaste de los metales en una corriente de granos abrasivos, se confirmó que existe una estrecha relación entre la resistencia al desgaste y las fuerzas de los enlaces en la red cristalina de los metales (Álvarez, 1995).

El estudio de dichos fenómenos permitió establecer que la capa superficial del metal se forma como resultado de la trayectoria de la deformación plástica del metal, teniendo esto lugar en condiciones de deformaciones de signo variable y bajo el surgimiento de diferentes cargas internas inducidas no simétricas de carácter cíclico. Por ello, los parámetros del estado físico-mecánico de la capa superficial, en particular la plasticidad, deben determinarse considerando este estado complejo de las cargas actuantes (Cheng *et al.*, 2000).

Courtney (2000), realiza una pesquisa sobre el comportamiento del desgaste de los materiales, donde define que este está influenciado tanto por parámetros externos característicos al sistema (velocidad, tamaño y forma del material abrasivo, condiciones ambientales, condiciones de carga), como por parámetros internos, que dependen de las características mecánicas de los constituyentes del tribosistema (microestructura, módulo de elasticidad, dureza y la tenacidad de fractura), sin embargo, la abrasión también depende del ángulo de impacto del abrasivo.

Aguilar (2002), desarrolla una máquina tribológica para realizar pruebas de desgaste abrasivo en un tribosistema acuoso, que permite caracterizar materiales y simular las condiciones de desgaste o fricción, dicha máquina se realiza con el fin de hacer uso de las ventajas tribológicas, para ser aplicadas en el diseño y construcción de dispositivos mecánicos con la finalidad de seleccionar el material óptimo, que tenga una vida útil predeterminada, así como proponer medios menos agresivos para los materiales.

Similar a otros autores, Rodríguez (2003), establece que el desgaste, en cojinetes de deslizamiento, influye sobre la vida útil de estos elementos y aún se ven hoy en día afectados por la fricción, dando origen a la repercusión del desgaste. El mismo propone que se lubriquen periódicamente dichos elementos, para mantener aún más la resistencia al desgaste de estos mecanismos. Recomienda realizar una selección adecuada de los sistemas de rodamientos a la hora de su puesta en servicio o en explotación.

Sabinet (2005), hace una caracterización del desgaste en elementos fabricados de materiales AISI 1045, principalmente en elementos de máquinas como árboles, ejes, pasadores, tornillos, entre otros. Este plantea que el contenido de carbono en el acero comúnmente no supera el 0,42 – 0,46 %, este acero posee alta resistencia, plasticidad y viscosidad en combinación con excelentes propiedades de ingeniería, baja tendencia a las deformaciones y formaciones de grietas y fisuras durante el temple, alcanzando valores de dureza de 56 – 58 HRC.

Álvarez (2006), caracteriza el fenómeno refiriéndose al desgaste por fatiga, donde esboza que el mismo está casi siempre presente y es propio de las transmisiones dentadas cerradas (reductores) donde recibe el nombre específico de "desgaste por picadura", el cual también es característico de los cojinetes de rodamientos, levas, entre otros.

Numerosos son los trabajos que se han venido desarrollando con el propósito de determinar las causas relacionadas con el desgaste abrasivo en los materiales. Entre los temas más tratados, se encuentran el de Sagaró *et al.* (2007), quienes analizan el comportamiento al desgaste abrasivo del acero 65 Mn 4, con y sin tratamiento térmico, empleado en los martillos de molino.

Alcántara *et al.* (2008), analizan la influencia del desgaste abrasivo en los pasadores de las esteras, estableciendo que cuando entran en contacto el casquillo y el pasador, el proceso de desgaste origina diferentes capas, las que a su vez adquieren diferentes durezas en correspondencia con el contacto mecánico entre las dos superficies modificando el tamaño del grano en la aleación.

Díaz (2008), define que el desgaste prematuro, en los pasadores de esteras de los tractores KOMATSU D85P-21, utilizado en equipos de laboreo minero, está dado por la corrosión, adhesión, abrasión y por la fatiga superficial a la que se somete el pasador, a las cargas variables de trabajo, y al trabajo continuo del equipo (fatiga), fenómenos que si se minimizan sus efectos, o se mejoran las propiedades del acero se puede alcanzar una vida útil del pasador más prolongada.

En el desgaste abrasivo influye la dureza y la tenacidad del material. La tenacidad es la resistencia que opone el material deformado por la acción de las partículas abrasivas, a la rotura. El desgaste depende también del coeficiente de fricción, fuerza de unión adhesiva entre partículas de la superficie del metal y las partículas abrasivas. Cuando los valores del coeficiente de fricción son elevados, se favorece el proceso de microcorte (Abad, 2009).

Tomacén (2010), realiza una caracterización del desgaste en el sistema biela – manivela del automóvil Hunday, dentro de los elementos del motor que se analizan, están los relacionados con la transmisión (pistón, aro de aceite y de fuego, camisa). El autor se basa en el análisis de los mismos fundamentado por el desgaste que han sufrido, para ello realizó un análisis metalográfico de las muestras de cada uno de los elementos.

Alcántara (2012), determina la influencia que genera el desgaste abrasivo y la fricción de un par tribológico metal – metal sobre los pasadores que componen las esteras de los equipos de laboreo minero, los cuales son fabricados de acero AISI 1045 tratado térmicamente. Se determinan las capas que se forman por la deformación plástica en frío (acritud); se establece una metodología de cálculo considerando diferentes cargas que se generan en la superficie del pasador, así como el análisis microestructural a través de técnicas de microscopía óptica que permiten establecer el tamaño del grano con estructura martensítica y sometido a compresión dinámica, al mismo tiempo se realizaron ensayos de dureza. Se obtienen modelos lineales de mínimos cuadrados, estadísticamente significativos, que muestran una tendencia creciente de sus propiedades mecánicas y funcionales, en la misma medida que se incrementan las variables independientes del proceso de experimentación (fuerza y desgaste).

Leyva (2012), caracteriza la influencia que genera la deformación plástica superficial en la tolerancia dimensional de los pasadores, que se utilizan en la cuchara mecánica, tipo CMA – 8.00/1.8, de la grúa de jaiba, empleada en la planta de preparación de mineral de la Empresa Productora del Níquel “Comandante Ernesto

Che Guevara”. Indica que es posible emplear el procedimiento de deformación plástica superficial para mejorar el acabado superficial de los pasadores al incrementar su dureza y acabado superficial; factores que influyen en el desgaste.

En la revisión bibliográfica efectuada sobre desgaste se aprecia que en ninguno de los trabajos consultados se considera la recuperación de los elementos mecánicos desgastados, con el empleo de otro elemento mecánico que sustituya la superficie desgastada.

1.5. Características de los cojinetes empleados en las máquinas

Los cojinetes se clasifican por lo general, según el tipo de rozamiento que experimentan y por el tipo de carga que soportan. Según Sawalhi y Randall (2008), el tipo de rozamiento se distingue por los cojinetes de fricción o de deslizamiento (cojinetes de contacto plano), y los cojinetes de antifricción o de rodadura. Entre los primeros se cuentan los cojinetes de casquillo completo o buje y los de casquillo partido. Entre los segundos los de bolas o rodillos.

Según la carga que soportan, se tiene:

- 1- Cojinetes radiales, que soportan cargas radiales transmitidas por ejes horizontales rotantes o gorriones;
- 2- Cojinetes axiales o de empuje, que soportan cargas axiales transmitidas por ejes verticales rotantes o pivotes;
- 3- Cojinetes de guías, que soportan cargas de distintos tipos, guiando los elementos móviles con trayectoria rectilínea, como son los patines de deslizamiento, de colisas (Sawalhi y Randall, 2008).

1.5.1. Deterioro de los cojinetes de contacto plano

Los cojinetes de contacto plano están diseñados para funcionar bajo condiciones de lubricación hidrodinámica, donde una delgada película de aceite separa al cojinete del eje. Es bajo estas condiciones cuando logran una larga vida útil. La pérdida de capacidad del cojinete se produce cuando dicha película es demasiado delgada como para separar las microirregularidades de las dos piezas, las cuales al entrar en

contacto generan un fuerte frotamiento con desprendimiento de partículas que erosionan las partes. Este proceso de desgaste ocurre en estas microirregularidades que conforman el área real de contacto la cual es mucho menor que el área aparente (área geométrica). En esos puntos de contacto real la presión específica es muy alta ocurriendo deformaciones y temperaturas que aceleran los procesos de desgaste. Un cojinete debe funcionar con un espesor de película de aceite superior a tres veces la suma de las rugosidades de las dos partes (para un eje y un cojinete con una terminación superficial típica de 0,5 micrones, el espesor mínimo de la película de aceite recomendada sería de 3 micrones). Las características de los materiales de los cojinetes son críticas en aquellos momentos donde el contacto metálico es inevitable debiendo soportar estas condiciones sin deteriorarse hasta que la película de aceite se restablezca (Cao, 2004).

1.6. Influencia de la exactitud en construcción de maquinaria

Además de las propiedades mecánicas y físicas de los materiales, otros factores que determinan el desempeño del producto manufacturado incluyen las dimensiones y superficies de sus componentes. Las dimensiones son los tamaños lineales o angulares de los componentes especificados en los dibujos de la pieza. Las dimensiones son importantes porque determinan la efectividad del ajuste entre los componentes de un producto durante su ensamble (González y Toscano, 1983).

Cuando se fabrica un componente dado es casi imposible y muy costoso obtener las piezas con las dimensiones exactas que se dan en los dibujos. En su lugar, se admite variaciones de las dimensiones y a esas variaciones admisibles se les llama tolerancia (Molina, 1983).

La exactitud en la construcción de maquinaria tiene una gran importancia para elevar las cualidades de explotación de las máquinas y para la organización del proceso tecnológico de su fabricación. El incremento de la carga específica y de la velocidad se puede lograr elevando la exactitud del tratamiento de las piezas.

No obstante, una exactitud excesivamente elevada provoca un aumento de los costos para la fabricación de la maquinaria y generalmente no implica un mejoramiento de las cualidades funcionales de la misma. Cuando las tolerancias son severamente estrictas, es decir, cuando se eleva la exactitud de fabricación de la maquinaria, crece el monto de trabajo, invertido en su fabricación (T) y el costo de su producción (C), siendo este último el que se incrementa más rápidamente que el primero. Para cada caso concreto se tiene una solución óptima en lo referente al establecimiento de la exactitud necesaria (Kórsakov, 1987).

1.7. Simulación con el empleo del método de elementos finitos

Pero-Sanz *et al.* (2000), plantean que la simulación de procesos es una de las más grandes herramientas de la ingeniería industrial, la cual se utiliza para representar un proceso mediante otro que lo hace mucho más simple y entendible. Mediante el método de elementos finitos es posible generar piezas de aspecto casi real, comprobar su comportamiento, bajo diversas condiciones de trabajo y estudiar el movimiento conjunto de grupos de sólidos. Lo que permite mejor conocimiento de un producto antes de que exista físicamente, siendo posible detectar muchos de los problemas que de otro modo se hubieran detectado en el servicio real.

Actualmente el método de los elementos finitos ha sido generalizado hasta constituir un potente método de cálculo numérico, capaz de resolver cualquier problema de la física como un sistema de ecuaciones, abarcando los problemas de la mecánica de fluidos, de la transferencia de calor, del magnetismo, entre otros. El método de elementos finitos, consiste en la transformación de un sistema de ingeniería con infinitas incógnitas a un modelo de elementos finitos. En realidad es una idealización matemática de un sistema real cuyo comportamiento deberá, al menos, de ser intuido, pues de otro modo la modelación puede ser muy laboriosa o imposible.

1.7.1. Etapas del método de elementos finitos

Según Boada (2003), el ciclo del análisis por elementos finitos incluye cinco etapas diferenciadas:

1. **Concepto:** en esta etapa se debe tener en cuenta los requisitos del problema a analizar. Hay que definir el modelo e incluir para el correcto análisis.
2. **Modelización:** esta etapa es también llamada pre - procesamiento. En este punto se diseña el objeto a analizar así como las condiciones de contorno.
3. **Análisis:** en este punto es en el que se hace el verdadero cálculo numérico del modelo de elementos finitos.
4. **Interpretación:** aunque todos los demás puntos son los que hacen posible el análisis, esta es en realidad la etapa más importante. Aquí es donde se da forma a los datos obtenidos, se interpreta su significado y se decide si el análisis es admisible o si, por el contrario, se debe proceder a realizar algún cambio. Desde esta etapa se puede volver atrás hasta el concepto, la modelización o incluso hasta una nueva interpretación de los mismos datos.
5. **Aceptación:** es el momento de realizar las conclusiones finales sacadas del análisis e interpretación de los datos obtenidos.

1.8. Características de los materiales para elaboración mecánica de piezas

Para conocer las propiedades mecánicas y composición química, de los aceros es necesario consultar normas, especificaciones y bases de datos.

Los aceros al carbono representan el grupo más importante de materiales metálicos para ingeniería. La característica más sobresaliente del acero es su versatilidad, ya que sus propiedades pueden ser controladas y modificadas con el fin de satisfacer los requerimientos de servicio. En estos aceros, los principales factores que afectan a sus propiedades mecánicas son el contenido en carbono y la microestructura (Guliaev, 1983).

Cuando el contenido de carbono se aproxima a 0,30 % y el de manganeso a 1,40 % puede aparecer tendencia al agrietamiento en frío, por lo que se recomienda la soldadura con proceso de bajo hidrógeno y el empleo de precalentamiento, cuando el espesor es mayor de 25 mm (Buraya, 2001).

Básicamente, la resistencia a la tensión, a la cadencia y la dureza, se incrementan al aumentar el contenido de carbono; por el contrario, la elongación, la reducción de

área y la tenacidad disminuyen notablemente con dicho incremento. Otro atributo del acero, el cual es seguramente de mayor importancia, es su capacidad para endurecer, cualidad que comúnmente se denomina templabilidad. Esta característica también se ve afectada con el aumento en el contenido de carbono (Datsko, 1991).

Aceros con un contenido de carbono entorno a un 0,4 - 0,5 % son usados ampliamente para la construcción de estructuras y diversas partes de maquinaria, como pernos, tornillos, ejes o engranajes, debido a su alta resistencia mecánica, a su resistencia al desgaste, a su elevada dureza y a sus favorables condiciones económicas como son su bajo costo y la garantía de abastecimiento (Jennifer et al., 2007).

Surian et al. (2005), plantean que para la unión de este tipo de acero se han empleado tradicionalmente los procesos convencionales de soldadura por fusión; estos tipos de soldadura presentan diversos tipos de problemas característicos del proceso.

1.8.1. Empleo de los aceros inoxidables para la fabricación de piezas

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

Los surtidos de estos productos generalmente aparecen en forma de laminados (barras, perfiles, planchas y tubos) o en productos fundidos. Los laminados se caracterizan por poseer contenidos de carbono inferiores a 0,1 %, lo que les asegura buena soldabilidad y la mínima presencia de fases de carburos en la estructura;

mientras que los fundidos poseen contenidos de carbono superiores al 0,25 % e inferiores a 0,5 %.

En las aleaciones fundidas, donde se requiere elevar la resistencia mecánica, los contenidos de carbono se incrementan 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.

1.9. Procesos tecnológicos para la elaboración de elementos de máquinas

Esta operación puede realizarse por doblado o plegado hasta que se obtenga la forma requerida tanto en frío como en caliente, siempre que las características del material no queden por debajo de las especificadas en el proyecto.

Cuando se realice el plegado o curvado en frío se respetarán los radios mínimos recomendados en la norma (UNE-EN 10025). En caso de no cumplirse las tablas de dicha norma y siempre que no se supere en la fibra más traccionada un alargamiento igual a la cuarta parte del de rotura del material; se deberá redactar un procedimiento específico en el que se indique el tratamiento térmico a aplicar y las medidas de control oportunas (Kuroda y Tvergaard, 2000).

Para la conformación en caliente se deberán seguir las indicaciones del suministrador, especialmente en el caso de aceros de grano fino (UNE - EN 10113). La duración y velocidad tanto del trabajo mecánico como del enfriamiento deben ser adecuadas para evitar el deterioro de la tenacidad y resistencia del acero. En particular se prohíbe cualquier manipulación en el intervalo de color azul (de 250 °C a 380 °C). La operación de plegado o curvado se llevará a cabo a temperatura de rojo cereza claro (de 950 °C a 1 050 °C) y se interrumpirá si baja a rojo sombra (alrededor de 700 °C.) La determinación de la temperatura de trabajo deberá ser constatada de forma eficaz (Schijve, 2004).

1.9.1. Soldadura con arco y metal protegido

La soldadura con arco y metal protegido (SMAW) es uno de los procesos de unión más antiguos, sencillos y versátiles. Hoy en día, un cincuenta por ciento de toda la soldadura en la industria y el mantenimiento se hace mediante este proceso. El arco eléctrico se genera tocando la pieza con la punta de un electrodo recubierto y retirándola con rapidez a la distancia suficiente para mantener el arco. Los electrodos tienen la forma de una varilla delgada y larga, por lo que este proceso se denomina también soldadura con varilla (Burgos, 1987, John, 2004).

Easterling (1992), plantea que el proceso de arco y metal protegidos se usa con frecuencia en la construcción en general, en astilleros, oleoductos y en trabajos de mantenimiento, porque el equipo es portátil y se puede reparar con facilidad. Es muy útil en zonas remotas, donde puede llevar un generador con motor de combustión como fuente de electricidad. El proceso se adapta bien para espesores de pieza de 3 a 19 mm, aunque se puede ampliar con facilidad este intervalo si los operadores son hábiles y usan técnicas de múltiples pasos. En consecuencia, los costos de mano de obra y material son altos.

1.9.1.1. Establecimiento de la tecnología de soldadura

Según Fosca (2003), el establecimiento de la tecnología de soldadura de un conjunto o ensamble soldado es una tarea de bastante complejidad que debe resolver el ingeniero mecánico. Es importante destacar que el establecimiento de una tecnología de soldadura no sigue una secuencia lineal de pasos, ya que el ingeniero debe hacer un análisis complejo, en el que una gran cantidad de las decisiones que va tomando dependen de otras y viceversa. La tecnología correcta será aquella que permita fabricar el ensamble soldado de la forma más rápida, sencilla, económica y que a la vez permita obtener un producto con la calidad necesaria.

La correcta elaboración de una tecnología de soldadura transcurre por una serie de etapas, siguiendo un orden lo más lógico posible. El ingeniero debe tener

claro que este no constituye en modo alguno un algoritmo lineal rígido, sino que solo representa una ayuda para la organización del trabajo, lo que es importante sobre todo para personas que comienzan en este tipo de tarea (Cary, 1998).

Se deberá disponer de un plan de soldadura aplicable a los aceros definidos que incluirá precauciones adecuadas frente al riesgo de desgarro laminar en caso de que se transmitan tensiones de tracción en el sentido perpendicular al espesor del material (Meyer, 1968)

1.9.2. Mecanizado de piezas

La maquinabilidad describe la facilidad con que un material puede ser maquinado, y está relacionada con las propiedades mecánicas de los mismos. Además de esto, esa maquinabilidad está igualmente relacionada con la composición química del material, su microestructura, resistencia y los parámetros de corte utilizados como: avance, velocidad de corte, profundidad de corte y fluido de corte (Oxley, 1989 y Trent, 2000).

Dada la naturaleza amplia de la ciencia del corte de los metales, un estudio sobre este tema puede ser abordado desde muchas perspectivas, como el material de la pieza a fabricar, las características de la herramienta, la temperatura y la fuerza en la zona de corte, la velocidad de corte, la cantidad y el tipo de viruta generada, la rugosidad obtenida, o bien la combinación de todos ellos (Bäker, 2002).

El mecanizado es uno de los procesos de fabricación más utilizados en la actualidad, especialmente en campos como el automovilístico o el aeronáutico. Por este motivo el estudio sobre estos procesos de eliminación de materiales está en auge en la industria actual (Kalpakjian *et al.*, 2002).

El mecanizado es un proceso donde los componentes que intervienen en el proceso son dispuestos de tal forma que las fuerzas externas aplicadas causen la fractura. Esta fractura ocurre debido a la combinación de esfuerzos flexionantes, a la fuerza de corte y al esfuerzo cortante. La presencia de los esfuerzos flexionantes en la zona

de deformación distingue el proceso de mecanizado de otro proceso de manufactura de deformación y separación Haber-Guerra *et al.*, (2001).

En el mecanizado mediante un filo de corte, la herramienta deforma parte del material de la pieza que luego se separa debido a la deformación plástica. La capa de metal que se convertirá en viruta sufre grandes esfuerzos cuando se aproxima al filo de corte. A medida que se alcanza la tensión de fluencia del material, tiene lugar la deformación plástica y elástica del mismo. La forma de la viruta varía considerablemente según sea el material de la pieza y con los diferentes parámetros de corte, pero si el metal es suficientemente tenaz, el proceso se asemeja a un flujo continuo de elementos en forma de lámina que se desprenden por esfuerzos cortantes (Schmitt *et al.*, 2002).

Los procesos de mecanizado constituyen en la actualidad el conjunto de procesos de fabricación más ampliamente difundidos en la industria. Esto se debe, entre otras razones, a su gran versatilidad en la obtención de geometrías y al nivel de precisión dimensional obtenido en comparación con otros procesos (Coromant Sandvik, 2007).

En el aspecto económico, el mecanizado resulta ventajoso cuando se requieren características especiales de superficie, especialmente si se trata de una pequeña producción (Kalpakjian *et al.*, 2002; Quiza, 2004). No obstante, el desperdicio de material que se produce durante el mecanizado hace que las ventajas económicas disminuyan.

1.10. Métodos estadísticos

Bajo el método científico, se consolidan leyes y teorías en diversas ramas del conocimiento, las cuales son expresables por medio de sistemas de ecuaciones diferenciales relacionadas con el método estadístico. En efecto, no es otra cosa lo que se realiza cuando en física se utilizan ecuaciones para describir el movimiento de una partícula, o se resuelven los balances correspondientes aplicando las leyes de conservación de la materia, energía o cantidad de movimiento; o bien cuando se

enfrenta el diseño de un equipo según los procedimientos que se conocen a partir del campo de las operaciones unitarias (Vélez, 1995).

Considera Sarache (2001), que resulta evidente que no todo sistema de ecuaciones puede resolverse fácilmente, al menos desde el punto de vista analítico. Esto impuso a lo largo de la historia limitaciones importantes al tipo de modelos que podían resolverse, o de otra forma, la necesidad de recurrir a hipótesis inadecuadas o restrictivas (supersimplificaciones) para al menos poder tratar el problema. No debe extrañar que aún, exista la necesidad de utilizar permanentemente parámetros en nuestros modelos, y por lo tanto, implican la necesidad de reemplazar las leyes básicas por aproximaciones causales obtenidas de datos experimentales.

Plantean Cox (1975) y Méndez (1980), que hasta ahora los métodos estadísticos estudiados pertenecen a la experimentación pasiva, o sea, aquella experimentación donde no interviene el hombre, donde este se limita a observar y a registrar los datos para luego elaborarlos. Sin embargo, en numerosas ocasiones el investigador se ve obligado a estudiar la influencia de la variable de entrada sobre las funciones de respuesta, aquí es donde es necesario planificar el experimento con un número de pruebas mínimo para ahorrar recursos materiales y humanos, así como el tiempo.

1.10.1. Métodos estadísticos en el control de la calidad

El control de la calidad, en su sentido más amplio, se refiere al control sistemático de aquellas variables de los procesos de producción que inciden en las características del producto (Hernández, 1986). Estos valores se deben a la aplicación de materiales, hombres, máquinas y a las condiciones de la producción. Los métodos estadísticos en el control de la calidad permiten reducir los costos de inspección, y controlar mejor la calidad de la producción, ya que liberan al control de la calidad de las ataduras del empirismo.

1.11. Conclusiones del capítulo 1

1. La revisión de trabajos precedentes permitió determinar que en ninguno de ellos se considera la recuperación, de los rodillos desgastados, con el empleo de un casquillo.
2. Se exponen fundamentos teóricos de la tecnología de la elaboración mecánica, los métodos estadísticos y los transportadores de tornillo sinfín, que sirven de base al diagnóstico y tecnología de fabricación del casquillo, para la recuperación de los rodillos radiales del transportador Jacobi.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

La fundamentación teórica acerca de conocimientos de criterios de diseños, los procedimientos de elaboración mecánica y control de la calidad, contribuyen a la selección adecuada de materiales y métodos para la solución de problemas asociados al diagnóstico y formulación de una tecnología de recuperación para componentes mecánicos desgastados.

En este capítulo se efectuó una caracterización de los recursos materiales utilizados y de los procedimientos empleados en la obtención y análisis de los resultados. Se efectúa una exposición de las características de los rodillos radiales del transportador Jacobi, de las propiedades de la materia prima utilizada, de los instrumentos de medición, así como de las máquinas y útiles. Además, se describen los procedimientos para la caracterización del ajuste formado entre el rodillo y el casquillo, el de la simulación del régimen de explotación con el método de elementos finitos, de la tecnología para la recuperación del rodillo y el del procedimiento estadístico para el análisis de los resultados de las mediciones, así como el cálculo económico.

En tal sentido el **objetivo del capítulo es:**

Desarrollar los procedimientos para la obtención de los principales parámetros de control y la tecnología de recuperación de los rodillos desgastados.

2.2. Características de los rodillos radiales del transportador sinfín

Los rodillos radiales, del transportador sinfín, en su conjunto (figura 2.1), son estructuras sólidas de 200,7 kg de peso; compuestos por un cuerpo llamado propiamente rodillo. Estos son fabricados de acero 55ГGOST o AISI 1045 de 40–46 HRC de dureza en la superficie según el proyecto. Van montados en dos rodamientos autoalineables N° 22315, según norma SKF, para girar sobre un eje fijo de material AISI 1045, que descansa sobre dos apoyos de hierro fundido de 240 MPa. A este eje en uno de sus extremos se le hace un agujero longitudinal de 8 mm

de diámetro hasta la distancia media del mismo, agujero que se interseca con otro transversal, para mediante unas copillas lubricar la zona de los cojinetes. Como accesorios complementarios posee dos tapas, dos prensaestopas, dos camisas, dos placas de seguro, dos discos, una junta y cordón de amianto magnesiano. Todos estos elementos están fijados con veintidós tornillos y catorce arandelas para hermetizar dichos rodamientos, evitando que entre polvo, agua y partículas contaminantes a las superficies de trabajo, además de poder mantener lubricada toda esa zona. Tiene unas dimensiones generales de 480 mm entre los apoyos y el diámetro del cuerpo giratorio es de 305 mm.



Figura 2.1. Ubicación de los rodillos radiales del transportador sinfín.

Fuente: Prieto (2013).

Estos rodillos radiales sirven de apoyo a las llantas las cuales poseen las siguientes características: tienen una masa de 288,8 kg, se construyen de acero 55 Г (GOST) y con una dureza de 50 – 55 HRC, hasta una profundidad de 10 mm; las mismas trabajan en condiciones ambientales adversas y agresivas donde el polvo y el agua están siempre presentes.

2.2.1. Características del régimen de explotación de los rodillos radiales

Las características del régimen de explotación de los rodillos radiales que fueron objeto de estudio en el presente trabajo, se muestran a continuación en la

tabla 2.1. Dichas características se tuvieron en cuenta en el proceso de simulación efectuado con el empleo del método de elementos finitos.

Tabla 2.1. Régimen de explotación de los rodillos (Prieto, 2013).

Materiales de los rodillos	Acero AISI 1045
Número de revoluciones	23,3 rev/min
Temperatura	250 ⁰ C
Fuerza	37 258,82 N
Flujo de agua	10 m ³ /h
% de sólido presente en el agua	1 %
Tiempo diario de trabajo	24 h
Diámetro exterior	305 mm
Diámetro interior	150 mm
Largo	260

2.3. Composición química de materiales utilizados

En la tabla 2.2 se muestra la composición química estándar del acero AISI 1045, material del que se proyectó la elaboración de los rodillos (Prieto, 2013 y Poll, 2014).

Tabla 2.2. Composición química estándar del acero AISI 1045 (%).

C	Mn	P	S	Si
0,42 - 0,50 %	0,40 - 0,90 %	≤ 0,060 %	≤ 0,040 %	0,20 - 0,52 %

Fuente: Prieto (2013) y Poll (2014).

2.3.1. Composición química del material del casquillo

La composición química estándar del acero AISI 321 se muestra en la tabla 2.3, material del que se proyectó la elaboración del casquillo. Dicha información se obtuvo a partir de la utilización de Software Materiales.

Tabla 2.3. Composición química estándar del acero AISI 321, en %.

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	N	T
0,08	2	0,045	0,03	0,75	9-12	17-19	0,10	0,7-0,9

2.3.2. Características de los electrodos

El proceso de soldadura se efectúa con electrodos revestidos E 347-16 y E 309L-16, para la unión de los extremos de la estructura que conformó el casquillo y el rodillo con el casquillo, respectivamente. La composición química que posee cada electrodo se muestra a continuación en la tabla 2.4 y 2.5.

Tabla 2.4. Composición química del electrodo E 347-16, en %(Conarco, 1988)

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Nb
0,03	0,76	0,032	0,005	0,9	10	18,5	0,25	0,4

Tabla 2.5. Composición química del electrodo E 309L-16, en %(Conarco, 1988)

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
0,02	0,69	0,022	0,009	0,8	13,4	22,5	0,16

2.4. Máquinas y útiles

El proceso de recuperación de los rodillos desgastados se lleva a cabo utilizando un conjunto de máquinas, herramientas e instrumentos de medición disponibles en el taller de maquinado, ubicado en la Empresa Productora de Níquel “Comandante Ernesto Che Guevara” Las características fundamentales de los recursos materiales empleados se refieren a continuación.

2.4.1. Máquina para soldar

Para la selección de la máquina se tiene en cuenta, el tipo de proceso, los valores de intensidad, tensión eléctrica y el tipo de corriente así como la polaridad a utilizar; todos estos datos son necesarios y con los que se deben realizar las costuras. Teniendo en cuenta estos factores se selecciona la máquina ARC-253 con los siguientes parámetros:

Alimentación trifásica (V) _____ 230/400

Voltaje circuito abierto (V) _____ 65

Electrodo (mm) _____ 2-5

Fusible (A) _____ 32/20

Potencia (KVA) _____ 12,8

Peso (kg) _____ 67

Campo de regulación(A) _____ 35/250

En el anexo 2 se puede observar la ilustración de la máquina de soldar que se emplea en la soldadura del proceso de recuperación de la superficie desgastada de los rodillos.

2.4.2. Torno universal 1 M 63

El torno utilizado en el proceso de recuperación del rodillo presenta las características que se muestran en las tablas 2.6 y 2.7.

Tabla 2.6. Número de revoluciones del torno 1 M 63, en rev/min.

10	12	16	20	25	31	40	50	63
80	100	160	200	250	315	400	500	630
800	1,000	1,250						

Tabla 2.7. Avances del torno 1 M 63, en mm/rev

0,064	0,077	0,083	0,096	0,102	0,109	0,115	0,125	0,134	0,147	0,166	0,192
0,198	0,210	0,230	0,258	0,275	0,305	0,404	0,430	0,467	0,510	0,588	0,600
0,770	0,815	0,860	0,942	1,025							

Potencia nominal del torno: 15 kw.

En el anexo 3 se puede observar la ilustración del torno 1 M 63 utilizada para la realización del maquinado en el proceso de recuperación del rodillo.

2.4.2.1. Cuchilla para el maquinado

Las herramientas de corte empleadas para el maquinado de las piezas se eligieron en dependencia de la operación tecnológica de mecanizado, las cuales deben garantizar el buen acabado del material que se elabora, las herramientas seleccionadas para la recuperación se hizo según los criterios de Sándwich Coromant (2007). Las cuchillas utilizadas para la realización del maquinado del diámetro exterior del rodillo desgastado y del diámetro interior y exterior del casquillo poseen las características que se muestran en la tabla 1 y 2 del anexo 4.

2.5. Instrumentos de medición utilizados

La realización del control de la calidad relativo a los parámetros que definen las características de los casquillos y del rodillo implicó la realización de mediciones con los instrumentos adecuados. Los instrumentos utilizados en la determinación del diámetro exterior e interior, así como la dureza se muestran a continuación.

2.5.1. Características del micrómetro

El micrómetro utilizado en la determinación del diámetro exterior del casquillo y el rodillo es de precisión 0,01 mm, el cual se muestra en la figura 2.2. Este equipo posee características especiales en sus diferentes partes: conserva un cuerpo que evita la variación de medida por dilatación, una parte llamada tope que determina el punto cero de la medida para evitar el desgaste y optimizar la medida, una espiga que determina la lectura del micrómetro, una tuerca de fijación que evita el desplazamiento de la espiga, un trinquete que limita la fuerza ejercida al realizar la medición, un tambor móvil que es solidario a la espiga con diferentes escalas de divisiones y un tambor fijo que es solidario al cuerpo con escala fija de 300 – 400 mm (Kiwix, 2010).



Figura 2.2. Micrómetro.

2.5.2. Pie de rey para realizar mediciones

El pie de rey o calibrador que permitió realizar la medición del diámetro interior del casquillo se representa a continuación en la figura 2.3. Este instrumento además de la escala principal, que está dividida en milímetros, tiene una escala de pequeña longitud que puede deslizarse a lo largo de la escala principal. Esta escala o nonio está dividida en 20 partes y con su ayuda la sensibilidad del instrumento es 0,05 mm. El pie de rey también está equipado con un freno para, una vez ajustado al cuerpo, evitar el deslizamiento del nonio durante la lectura.

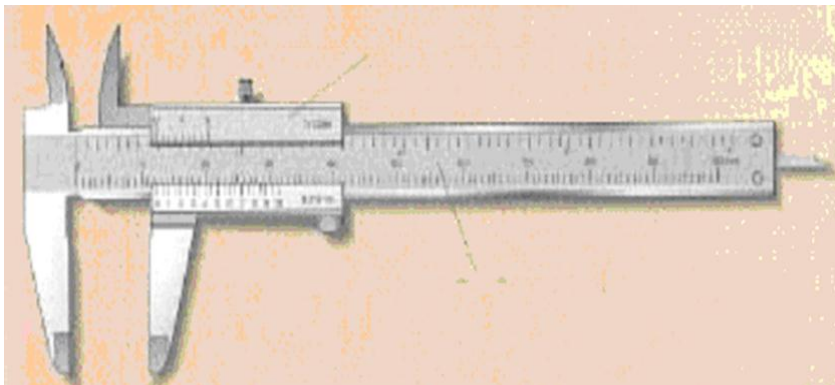


Figura 2.3. Pie de rey o calibrador de VERNIER.

2.5.3. Durómetro para realizar las mediciones de dureza

En la figura 2.4 se muestra el instrumento de medición portátil que se empleó para la determinación de la dureza de la superficie exterior del casquillo. El principio de funcionamiento del instrumento se basa en el impacto de un objeto que posee cierto peso a la superficie que se le quiere medir la dureza, bajo cierta fuerza experimental. La dureza se mide como la relación entre la medida de la velocidad

que impacta y la velocidad que rebota el impacto respectivamente, cuando se ha desplazado 1mm por encima de la superficie la aguja percutora en el rebote.



Figura 2.4. Durómetro digital modelo TH170.

Las principales características que muestra este equipo son: puede realizar mediciones de dureza en la escala HRC, HRB, HB, HV y HS, según el material que se le quiera realizar la medición. Debe operar en un ambiente con temperatura en el rango de 0 °C a 40 °C, humedad relativa menor o igual a 90 %; evitar las vibraciones, campos magnéticos y medio corrosivo.

2.6. Determinación de los parámetros del ajuste

Los pasos que se llevaron a cabo para la determinación de los parámetros que caracterizan al ajuste móvil con juego entre la superficie definida por el diámetro exterior del rodillo (eje) y la interior del casquillo (agujero) se definen a continuación:

1. Selección del ajuste que satisface las exigencias técnico económicas que se le imponen a la unión del eje con el agujero. Esto se realizó con arreglo a las recomendaciones expuestas en Martínez *et al.*, (1985), ver anexo 5.
2. Determinación de las desviaciones del agujero y del eje. Se realizó conforme a las especificaciones establecidas en la norma cubana: [NC 16-30: 1980]
3. Determinación de las dimensiones límites del agujero y el eje. El cálculo del diámetro máximo y el mínimo para las dimensiones de las superficies conjugadas se efectuó con arreglo a las expresiones que se muestran a continuación.

$$D_{\text{máx.}} = D + \Delta S \quad (2.1)$$

$$D_{\text{mín.}} = D + \Delta I \quad (2.2)$$

$$d_{\text{máx.}} = d + \Delta s \quad (2.3)$$

$$d_{\text{mín.}} = d + \Delta i \quad (2.4)$$

Donde:

$D_{\text{máx.}}$ y $D_{\text{mín.}}$ - Es el diámetro máximo y mínimo del agujero respectivamente, mm.

$d_{\text{máx.}}$ y $d_{\text{mín.}}$ - Es el diámetro máximo y mínimo del eje respectivamente, mm.

D y d - Es el diámetro nominal del agujero y del eje respectivamente, mm.

ΔS y Δs - Es la desviación superior del agujero y del eje respectivamente, mm.

ΔI y Δi - Es la desviación inferior del agujero y del eje respectivamente, mm.

4. Cálculo de los juegos y aprietos. La determinación de los juegos y aprietos del ajuste se efectuó a través de las siguientes fórmulas:

$$J_{\text{máx.}} = A_{\text{mín.}} = D_{\text{máx.}} - d_{\text{mín.}} \quad (2.5)$$

$$J_{\text{mín.}} = A_{\text{máx.}} = D_{\text{mín.}} - d_{\text{máx.}} \quad (2.6)$$

Donde:

$J_{\text{máx.}}$ - Es el juego máximo, mm.

$A_{\text{mín.}}$ - Es el apriete mínimo, mm.

$J_{\text{mín.}}$ - Es el juego mínimo, mm.

$A_{\text{máx.}}$ - Es el apriete máximo, mm.

5. Determinación de la tolerancia. El cálculo de la tolerancia dimensional referida a la superficie del diámetro exterior del rodillo y la interior del casquillo se llevó a cabo utilizando la expresión que se refiere a continuación:

Agujero

$$T_a = |D_{\text{máx.}} - D_{\text{mín.}}| \quad (2.7)$$

Eje:

$$T_e = |d_{\text{máx.}} - d_{\text{mín.}}| \quad (2.8)$$

Donde:

Ta.- tolerancia del agujero, mm.

Te.- tolerancia del eje, mm.

6. Determinación de la rugosidad del agujero y la del eje. La rugosidad que se admite en la superficie de las partes conjugadas se determinó a partir del valor de la tolerancia dimensional establecida y el empleo del gráfico que se muestra en el anexo 6.

7. Determinación del error de forma para las superficies acopladas. La tolerancia de forma para las superficies acopladas en el ajuste se calculó utilizando las recomendaciones formuladas en Casanova (1986).

Recomendaciones: para superficies cilíndricas.

$$T_f = 30\%T \quad (2.9)$$

$$T_f = 20\%T \quad (2.10)$$

$$T_f = 12\%T \quad (2.11)$$

Las ecuaciones 2.9, 2.10 y 2.11 se emplean en función de la clase de precisión geométrica definida para la superficie, la A indica precisión geométrica normal, B precisión geométrica alta y C precisión geométrica elevada, respectivamente.

2.7. Simulación con el método de elementos finitos del conjunto casquillo-rodillo

Para poder llevar a cabo, de una manera organizada la obtención de los resultados de la simulación y su análisis, el proceso de simulación se desarrolló siguiendo los pasos lógicos del procedimiento que se refiere a continuación, en orden cronológico. La simulación fue realizada para el casquillo individualmente puesto que para esta condición es que existe la menor resistencia a los esfuerzos.

1. Se construyó un modelo geométrico para el casquillo. El modelo geométrico se elaboró en el propio software, a partir del conocimiento de las dimensiones tanto del casquillo como del rodillo y las condiciones de carga.
2. Se especificó las propiedades del material. Las propiedades del material se definieron a partir de la información que se encuentra disponible en la biblioteca de materiales del software, pues el material del casquillo está incluido en la referida data.
3. Se planteó las restricciones para los grados de movilidad. La restricción a los grados de libertad para el modelo se planteó considerando un empotramiento.
4. Se aplicó la carga que actúa sobre el elemento. La carga se consideró concentrada, pues el contacto entre llanta y rodillo se realiza aproximadamente sobre una línea.
5. Se definió el mallado del elemento. La tolerancia del mallado se fue ajustando hasta un valor mínimo, atendiendo a las posibilidades que ofreció el software y la importancia que se le concedió al análisis.
6. Se ejecutó el cálculo de la simulación según el modelo definido para la situación estudiada. El cálculo se realizó considerando el criterio de la máxima tensión de von Mises, y se evaluó el coeficiente de seguridad obtenido según tres criterios.
7. Análisis de los resultados obtenidos en la simulación. El análisis de los resultados se realiza a partir de la generación de un informe.

2.8. Procedimiento para la elaboración de la tecnología de recuperación

El proceso de recuperación del rodillo se desarrolló en el taller de maquinado de la Empresa Productora de Níquel “Comandante Ernesto Che Guevara”, para lo cual se hizo necesario ajustarse a las condiciones de que se disponía, y a las especificaciones de calidad, definidas en los correspondientes planos (ver anexo 7 y 8).

La tecnología para la recuperación del rodillo implicó el desarrollo de las siguientes operaciones tecnológicas.

1. Corte del semiproducto.

2. Elaboración de los biseles en la chapa para el casquillo.
3. Conformación del casquillo.
4. Aplicación de los cordones de soldadura a la superficie biselada del casquillo.
5. Maquinado de la superficie desgastada del rodillo.
6. Elaboración de biseles en la superficie maquinada del rodillo.
7. Aplicación de los cordones de soldadura a la superficie biselada del rodillo para provocar la unión entre el rodillo y el casquillo.
8. Obtención del acabado superficial requerido para la superficie del rodillo.

2.8.1. Determinación de los parámetros del proceso de soldadura

El carbono equivalente se determinó por la necesidad de realizar precalentamiento o no de la región a soldar, así como el cálculo de la temperatura de precalentamiento, de acuerdo con Seferian (1962). Dicha expresión se utilizó en el análisis de la soldabilidad de acero al carbono AISI 1045.

$$C_{eq} = C + \frac{Mn + Cr}{20} + \frac{Ni}{18} + \frac{7 \cdot Mo}{90} \quad (2.12)$$

Donde:

C_{eq} .- carbono equivalente; %

C .- carbono

Mn .- manganeso

Cr .- cromo

Mo .- molibdeno

Ni .- níquel

Para tener en cuenta la influencia que ejerce el espesor en la soldabilidad se determinó el coeficiente de rectificación, a través de la siguiente expresión.

$$N = 0,005 \cdot S \cdot [C] \quad (2.13)$$

Con:

S.- espesor de chapa, en mm

Por lo tanto el carbono equivalente real se determinó de la siguiente forma.

$$[C]_R = [C] + N \quad (2.14)$$

Después de haberse determinado el carbono equivalente se calculó la temperatura de precalentamiento con la ayuda de la fórmula (2.15) que se muestra a continuación.

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{[C]_R - 0,25} \quad (2.15)$$

Tp.- es la temperatura de precalentamiento en °C.

2.8.1.1. Cálculo del contenido de ferrita

El diagrama de Schaeffler (figura 2.5), que interrelaciona la composición química, del material base y del electrodo, con la estructura de estos, permitió evaluar la calidad del cordón de soldadura que se forma en la chapa de acero AISI 1321 con electrodo E 347-16, y el que se logra al provocar la soldadura disímil entre el acero AISI 1045 y el AISI 321 con electrodo E 309L - 16.

Para el empleo del diagrama de Schaeffler se partió del cromo y el níquel equivalente del material base y del electrodo, que se determinaron según las ecuaciones 2.16 a la 2.18. La ecuación 2.17 se utilizó para la determinación del níquel equivalente correspondiente al acero AISI 1045, mientras que la 2.18 se empleó en el cálculo del níquel equivalente de los aceros inoxidable presentes en los análisis.

$$[Cr] = \%Cr + Mo + 1,5 \cdot \%Si + 0,5 \cdot \%Nb \quad (2.16)$$

$$[Ni] = \%Ni + 15 \cdot \%C + 0,5 \cdot \%Mn \quad (2.17)$$

$$[Ni] = \%Ni + 30 \cdot \%C + 0,5 \cdot \%Mn + 30 \cdot N \quad (2.18)$$

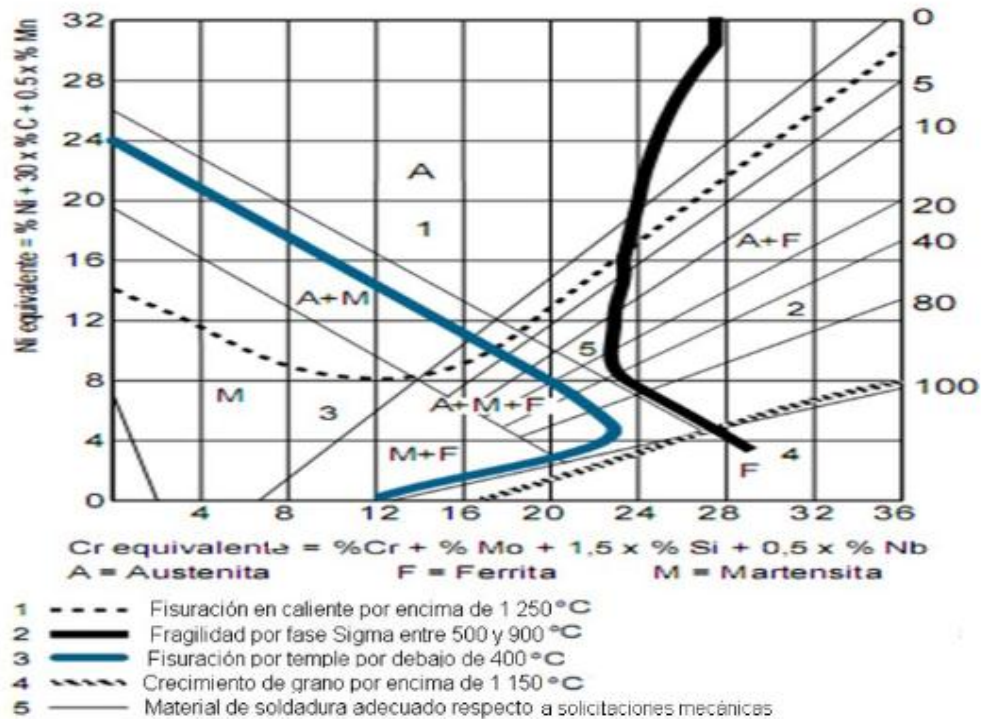


Figura 2.5. Diagrama de Schaeffler.

Fuente: Fernández *et al.* (2004)

Cuando se trató de la soldadura para la formación del casquillo, el punto correspondiente al material depositado se encontró entre la recta trazada por los puntos correspondiente al acero AISI 321 y al electrodo E 347-16. Su ubicación se definió en un 30 % sobre la recta desde el punto correspondiente al electrodo, puesto que se trata de una soldadura manual con arco eléctrico.

En el caso de la soldadura disímil para el ensamble del conjunto casquillo-rodillo, se graficaron los puntos correspondientes al cromo y el níquel equivalente de ambos materiales base (AISI 1045 y AISI 321). Se obtiene el punto medio de la recta trazado entre ambos puntos. Después se unió este punto con el punto correspondiente al electrodo E309-16. La composición del material depositado se encontró dentro de esta recta a un 30% desde el punto correspondiente al electrodo

2.8.1.2. Cálculo de la cantidad de electrodos

El cálculo de la cantidad de electrodos utilizados, se efectuó con la utilización de la expresión:

$$C_e = \frac{S \cdot L_c}{10^6} \delta (1,2) \quad (2.19)$$

Donde:

C_e .- cantidad de electrodos; kg

S .- sección de la junta; cm^2

L_c .- longitud a soldar; mm

10^6 .- factor de conversión.

δ .- peso específico del material; kg/dm^3

1,2 - coeficiente que tiene en cuenta las pérdidas por salpicaduras, el calentamiento y el aprovechamiento del electrodo.

2.8.1.3. Área de la sección transversal para el cordón del casquillo

El área del cateto de soldadura se determina a través de los lados de dicho cateto:

$$S_1 = 2 \cdot a \cdot b \quad (2.20)$$

Área de la sección transversal para el cordón de la junta del casquillo y el rodillo.

$$S_2 = a \cdot b \quad (2.21)$$

Donde a y b son la longitudes de los catetos de soldadura, mm.

2.8.1.4. Determinación de la intensidad máxima de corriente

La intensidad de corriente se estableció de acuerdo a la recomendada por el fabricante, la cual está en un rango; tomándose de la tabla 2.8 en dependencia del diámetro del electrodo.

Tabla 2.8. Relación de diámetro de electrodo Vs amperaje de soldadura (Conarco, 1988).

E 309 L-16	Ø X L (mm)	2,4 x 300	3,2 x 350	4,0 x 350	4,8 x 350
	A	60 - 90	90 - 120	120 - 160	150 - 190
E 347-16	Ø X L (mm)	2,4 x 300	3,2 x 350	4,0 x 350	4,8 x 350
	A	60 - 90	90 - 120	120 - 150	150 - 190

2.8.1.5. Tensión eléctrica del arco de soldadura

La tensión eléctrica de la máquina se calculó por la siguiente ecuación:

$$V = K + \frac{ld}{10} i \quad (2.22)$$

Donde:

U .- tensión eléctrica, V.

K .- coeficiente que depende del material a soldar (12 para los aceros).

L .- longitud del arco, mm.

d .- diámetro del electrodo, mm.

i .- densidad de corriente, A/mm².

2.8.1.6. Tiempo total para ejecutar la soldadura

Es necesario determinar el tiempo para ejecutar la soldadura, la misma depende de la corriente a emplear, del peso y de las características geométricas del cordón:

$$T = \frac{\rho A_d}{I \alpha_d \epsilon} \cdot L \quad (2.23)$$

Donde:

T .- tiempo total de la soldadura, hr.

α_d .- coeficiente de depósito, $\frac{g}{Ah}$

I .- intensidad de corriente, A.

ρ .- peso específico, g/cm³.

Ad.- área de depósito, cm².

ε .- rendimiento del taller

L.- longitud de la soldadura, m.

2.8.1.7. Determinación de los gastos de tiempo de trabajo

El tiempo de trabajo como regla debe ser tiempo útil completamente normado. Al obrero hay que crearles las mejores condiciones de trabajo que permitan en el transcurso de la jornada utilizar el tiempo económico racional (Feschenko, 1983).

En el tiempo total entran todas las categorías de gastos de tiempo de trabajo.

$$T_{pu} = T_b + T_a + T_{pt} + T_{org} + T_{dnp} + T_{dnp} \quad (2.24)$$

Donde:

T_{pu} - tiempo por unidad de producción y la suma de todos los tiempos de las diferentes categorías.

T_b .- tiempo básico o principal de máquina.

T_a .- tiempo auxiliar.

T_{pt} .- tiempo de procesos tecnológicos.

T_{org} .- tiempo organizativo.

T_{dnp} .- tiempo de descanso y necesidades personales.

El tiempo por unidad de producción de las normas técnicamente fundamentadas es el tiempo necesario para ejecutar la operación tecnológica dada al aplicar los métodos modernos de maquinado, experiencias de los trabajadores de avanzadas con innovadores.

El tiempo básico es el tiempo que se gasta en cambiar las dimensiones, la forma y rugosidad de la pieza y puede ser manual o de máquina

El tiempo auxiliar es el tiempo que se gasta para el cuidado del puesto de trabajo y otros gastos como buscar herramientas, limpieza de la máquina, llamado también T_{spt} (tiempo de servicio al P/T).

$$T_{spt} = (0,04 \dots 0,08) T_b \quad (2.25)$$

El tiempo auxiliar es el que se gasta en la colocación de piezas, arranque y parada de la máquina, conexión y desconexión del avance, medición de la pieza.

$$T_a = (0,18 \dots 0,25) T_b \quad (2.26)$$

El tiempo es aquel en el cual se realiza un trabajo productivo dirigido al concepto de una tarea (operación).

$$T_{org} = T_b + T_a \quad (2.27)$$

El tiempo de descanso y necesidades personales es donde se consideran las pausas y descanso físico. Este tiempo suele descontarse de la jornada laboral.

$$T_{dnp} = (0,17 \dots 0,25) \text{ , para una jornada de trabajo de (4 horas)}$$

En el tiempo por causas organizativas se considera:

$$T_{pco} = (2 \%) T_b \quad (2.28)$$

En el tiempo por causas técnicas:

$$T_{pct} = (1,6 \%) T_b \quad (2.29)$$

El tiempo total del proceso tecnológico

$$\sum T_{total} = T_{pu} + T_o + T_{pet} + T_{ct} \quad (2.30)$$

2.8.2. Determinación de los parámetros del proceso de maquinado

Los parámetros fundamentales de los regímenes de corte son: avance de la herramienta, número de revoluciones del husillo, velocidad de corte y profundidad de corte.

2.8.2.1. Velocidad de corte

La velocidad adecuada de corte depende de varios factores y en ningún caso se debe superar la que aconsejan los fabricantes de las herramientas (Casillas, 1987).

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (2.31)$$

Donde:

V_c .- velocidad de corte; m/min.

D .- diámetro de la pieza; mm.

n .- número de revoluciones por minutos de la herramienta; rev/min.

1000 .- factor de conversión de metro a milímetro.

A partir de la ecuación 2.31 se obtuvo la ecuación 2.32 que permite el cálculo del número de revoluciones a la que se realiza el paso tecnológico de maquinado.

$$n = \frac{\pi \cdot D \cdot V_c}{1000} \quad (2.32)$$

2.8.2.2. Profundidad de corte

Es la dimensión de la capa de metal que arranca la cuchilla de una pasada. Si una pieza cilíndrica de diámetro D se tornea de una pasada de la cuchilla hasta el diámetro d . La profundidad de corte se determinó como la mitad de la diferencia entre los diámetros.

$$t = \frac{D - d}{2} \quad (2.33)$$

Donde:

t .- profundidad de corte; mm.

d .- diámetro de la pieza después de la elaboración; mm.

2.8.2.3. Avance

Un parámetro importante en todos los procesos de maquinado es el avance de corte el cual está en función de la profundidad de corte y el esfuerzo de flexión de la cuchilla. Se determinó en tabla suministrada por el fabricante de la herramienta de corte.

Después de determinado se corrigió por el pasaporte de la máquina.

2.8.2.4. Cantidad de pasadas

$$i = \frac{t}{t_{cuchilla}} \quad (2.34)$$

Donde:

i .- números de pasadas.

$t_{cuchilla}$.- profundidad de corte de la cuchilla, mm.

t .- profundidad de corte, mm.

2.8.2.5. Tiempo de maquinado

Es el tiempo invertido por el operario en la ejecución del trabajo, también conocido por tiempo básico o tiempo total de maquinado (Fernández, 2007).

$$T_m = \frac{L}{n.s} . i \quad (2.35)$$

Donde:

T_m .- tiempo de maquinado; min.

L .- longitud a maquinar; mm.

i .- número de pasadas.

s .- avance de la herramienta; mm/rev.

2.9. Procedimiento para la elaboración del resultado de las mediciones

Para aumentar la representatividad y considerar la incertidumbre de los resultados en la determinación de los parámetros de control de los rodillos se efectuaron repeticiones de las mediciones, las cuales se analizan sobre la base de criterios estadísticos. Las expresiones matemáticas y procedimientos que se utilizaron en el análisis son las que se plantean a continuación.

2.9.1. Muestreo aleatorio simple

La cantidad de mediciones a realizar se determinaron sobre la base del sentido común y el modelo matemático propuesto por Miller *et al.* (2005). Comúnmente se efectúan tres mediciones de una cierta cantidad de magnitud para evaluar la medida de la tendencia central y, para determinar el tamaño de una muestra en un muestreo aleatorio simple se ha propuesto el siguiente modelo:

$$n = \left[Z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{E} \right]^2 \quad (2.36)$$

Donde:

n.- tamaño de la muestra.

$Z_{\alpha/2}$.- Es el estadístico de la distribución probabilística de Gauss. Se determina en la tabla 3 de Miller *et al.* (2005).

Σ .- Es la desviación típica poblacional.

E.- Es el error máximo de estimación. Se determina despejando en la ecuación 2.36.

2.9.2. Aseguramiento de la normalidad

El análisis estadístico de la medida de la tendencia central se efectuó aplicando las expresiones matemáticas que se refieren a continuación, de acuerdo con Miller *et al.* (2005).

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} X_i}{n} \quad (2.37)$$

$$LT_{Xmáx} = \bar{X} + t_{\alpha/2} \cdot S \quad (2.38)$$

$$LT_{Xmín} = \bar{X} - t_{\alpha/2} \cdot S \quad (2.39)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (2.40)$$

Donde:

$\bar{X}$.- media aritmética de las mediciones realizadas del correspondiente parámetro, se expresa en la misma unidad de medida del parámetro.

$LT_{Xmáx}$.- límite superior de tolerancia para el correspondiente parámetro, se expresa en la misma unidad de medida del parámetro.

$LT_{Xmín}$.- límite inferior de tolerancia para el correspondiente parámetro, se expresa en la misma unidad de medida del parámetro.

t .- estadístico de la distribución probabilística de “t-Student”.

S .- desviación típica muestral, se expresa en la misma unidad de medida del parámetro.

n .- total de observaciones.

En caso que existieron valores anormales, los mismos se eliminaron procediendo como se indica a continuación, de acuerdo con Hernández (1986): para el conjunto de valores obtenidos en la medición se calcularon $\bar{X}$ y S (teniendo en cuenta en estos cálculos incluso aquellos valores considerados sospechosos); se estableció el intervalo dado por la ecuación 2.38 y 2.39, y se eliminaron por considerarse como anormales todos los valores que quedaron fuera del intervalo establecido, se realizaron nuevamente los cálculos necesarios para expresar el resultado elaborado o final, sin considerar como es lógico, los valores anormales.

2.9.3. Prueba de hipótesis estadística relativa a dos medias

Este procedimiento se aplicó con el objetivo de determinar si las variaciones mostradas entre los valores de los parámetros de control (dureza y diámetros) son significativas.

1. Definición de las hipótesis

Hipótesis nula (H_0): No existe diferencias significativas entre las medias.

Hipótesis alterna (H_1): Existe diferencias significativas entre las medias.

2. Nivel de significancia: α

3. Criterio de rechazo de la hipótesis nula: Se rechaza la hipótesis nula si $t < -t_{\alpha/2}$ o $t > t_{\alpha/2}$ con $v=n-1$ grados de libertad, donde $t_{\alpha/2}$ es el estadístico de la distribución de Student, n es la cantidad de observaciones consideradas en el cálculo y t se determina por la siguiente fórmula (Miller *et al.* 2005).

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{S / \sqrt{n}} \quad (2.41)$$

Donde:

μ .- media poblacional, los demás parámetros ya se definieron anteriormente.

4. Cálculo: El cálculo para la prueba se efectuó utilizando la herramienta de análisis de datos programa en el Tabulador Microsoft Excel.

5. Decisión: La decisión se toma sobre la base del criterio definido para el rechazo de la hipótesis nula.

2.10. Análisis económico

Para la estimación de los costos de recuperación del rodillo se parte de la metodología del cálculo del costo de fabricación conocida como “Ficha para costos, precios y su componente en pesos convertibles” que en formato de hoja de cálculo se utiliza como Norma empresarial para calcular las fichas de costo. Dicho documento fue elaborado conjuntamente por los Ministerios de Finanzas y de

Economía y Planificación.

Es posible como información de carácter general, calcular costos y consumos para un trabajo efectuado con cualquier proceso de soldadura por arco, pudiendo de esta manera evaluar alternativas de diseño, de procedimiento o proceso y presupuestar el trabajo correspondiente. La dificultad de estos cálculos está en determinar, con la precisión que requiera el caso, la sección de la junta a rellenar, que será la que permita establecer la cantidad de material de aporte necesario. En la ecuación 2.42 se relacionan los parámetros a considerar en el cálculo económico de una operación de soldadura.

$$CT = \frac{M}{J} + \frac{C}{D.B} + \frac{E.U.I}{1000.D} + \frac{A}{D.B} \quad (2.42)$$

Donde:

CT .- costo total; \$/kg

M .- costo del material de aporte; \$/kg

C .- costo de la MO directa; \$/h.

A .- costos indirectos (MO indirecta, seguro, flete mecanizado); \$

E .- costo de la energía eléctrica; \$/kWh

D .- velocidad de deposición; kg/h

J .- rendimiento del material o eficiencia del proceso; %

B .- factor de marcha u operatividad; %

U .- tensión; V

I .- corriente; A

Con el propósito de reflejar los consumos, tanto directos como indirectos, por unidad de producción se utilizan las fichas de precios, las cuales permiten:

- Comparar los gastos reales con los planificados o con los gastos normados.

- Comparar los costos de una unidad determinada de producto en un período determinado, con los obtenidos en períodos anteriores.
- Comparar los costos entre empresas con producciones similares.
- Establecer el precio de venta del producto.

La metodología empleada está destinada para el estimado del cálculo del costo de fabricación para diferentes procesos tecnológicos que se llevan a cabo en la Unión del Níquel, poseyendo además una amplia y actualizada base de datos que comprende tarifas salariales, máquinas herramienta y sus consumos de energía eléctrica, precios de materiales, entre otros, resulta factible emplear esta norma por cuanto posee una base de información de larga data en la empresa mecánica del níquel, además de su probada efectividad en las transacciones económico-financieras de dicho centro.

A fin de revelar las ventajas en el orden técnico-económico de la recuperación, se procederá a la comparación entre el costo de recuperación del rodillo, y el costo de la de fabricación de uno en la empresa mecánica del níquel. La valoración del estimado se hace sin considerar el costo por concepto de transportación.

2.11. Conclusiones del capítulo 2

3. Se expone las características de los materiales fundamentales que fueron seleccionados para la implementación y control de la tecnología de recuperación de rodillos radiales para el transportador Jacobi, con el empleo de un casquillo que sustituye la superficie desgastada.
4. Se describen los procedimientos para la obtención de los resultados en la elaboración de la tecnología de recuperación y el control de la calidad de los parámetros fundamentales del rodillo recuperado, lo que permite ofrecer garantía de la recuperación que se propone.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Introducción

En el presente capítulo se analizan los resultados obtenidos a partir de los procedimientos descritos en el capítulo anterior, se establece un conjunto de criterios que sustentan las teorías que garantizan la veracidad de la hipótesis planteada como resultado del análisis y el procesamiento de la información obtenida. Se realiza la determinación de los parámetros del ajuste móvil definidos entre el casquillo y el rodillo, un análisis de la resistencia mecánica del casquillo, el cálculo de los parámetros de la tecnología de soldadura y maquinado, la evaluación de los parámetros de control del casquillo y del rodillo, la valoración económica y el análisis de los efectos ambientales asociados a los resultados de la investigación.

Se plantea como **objetivo:**

Realizar una valoración de resultados y a través de ella, exponer los fundamentos científicos que dan solución al problema planteado.

3.2. Determinación de los parámetros del ajuste entre el casquillo y el rodillo

Para el ajuste entre la superficie interior del casquillo y la exterior del rodillo se selecciona un ajuste móvil con juego, sobre la base de que se aplica soldadura a los extremos de las superficies ajustadas para lograr la fijación. El empleo de este ajuste en lugar de uno prensado o indeterminado disminuye los costos del montaje ya que no se requiere de calentamiento, golpes o uso de dispositivos especiales para lograr el acople entre las superficies. La tabla 3.1 muestra las variantes de ajuste móviles con juegos preferidos, según las recomendaciones expuestas en el sistema de eje único (anexo 5).

Tabla 3.1. Variantes de ajustes preferidos recomendadas del sistema de eje único.

Variante 1	Variante 2	Variante 3
Ø 294 F8/h6	Ø 294 F9/h8	Ø 294 D11/h11

El empleo del sistema de eje único en lugar del de agujero único se justifica en los siguientes argumentos: se trata de un ajuste que requiere un juego móvil simplemente para el montaje de las superficies acopladas, por lo que no hay alta exigencia en la obtención de las dimensiones; en caso de no lograrse las mismas, para el montaje, se obtendrá el ajuste deseado maquinando la superficie interior del casquillo, ya que este posee menor peso que el rodillo; y, se puede considerar la posibilidad de realizar el montaje aplicando presión, ya que no se requiere de movimiento relativo entre las superficies acopladas para el funcionamiento normal de la unión.

A partir del análisis de las variantes de ajustes posibles a utilizar, referidas en la tabla 3.1 se selecciona la variante 2. La selección del ajuste Ø 294 F9/h8 se realiza sobre la base de un compromiso entre economía y precisión, pues si se opta por la variante de menor costo el seleccionado sería Ø 294 D11/h11 de otro modo sería Ø 294 F8/h6, de acuerdo a lo expuesto por Kórsakov (1987).

La tabla 3.2 muestra los parámetros del ajuste seleccionado, de acuerdo a las recomendaciones expuesta en el sistema de eje único y las indicaciones planteadas en el procedimiento definido en el capítulo anterior. Se escoge un nivel de precisión geométrica normal (A), para el establecimiento del error de forma, atendiendo a que las superficies del ajuste no requieren de mucha precisión ya que no habrá movimiento relativo entre ellas.

Tabla 3.2. Parámetros del ajuste seleccionado: Ø 294 F9/h8.

Parámetros	Ecuación	Resultados	Unidad de medida
Desviaciones del agujero		+ 186 + 56	µm
Desviaciones del eje		0 -81	µm
Diámetros máximo y mínimo del agujero	2.1 y 2.2	294,186 y 295,056	mm
Diámetros máximo y mínimo del eje	2.3 y 2.4	294 y 293,919	mm
Juego máximo y apriete mínimo	2.5	0,267	mm
Juego mínimo y apriete máximo	2.6	0,056	mm
Tolerancias del agujero y del eje	2.7 y 2.8	0,130 y 0,081	mm
Rugosidad del agujero y del eje, Ra		20 y 10	µm
Tolerancia de forma del agujero y del eje, A	2.10	0,039 y 0,0243	mm

En el Anexo 7 y 8 se indican en el plano del casquillo y el rodillo, respectivamente, los parámetros que caracterizan al ajuste entre las superficies del casquillo y del rodillo. Los parámetros del ajuste indicado constituyen un referente numérico importante para la realización del control de la calidad del proceso de recuperación de los rodillos radiales objeto de estudio, con el empleo de un casquillo.

3.3. Análisis de la resistencia mecánica del casquillo

La figura 3.1 muestra el modelo físico construido para la simulación del proceso de explotación de los casquillos en la Planta de Horno de Reducción de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, junto a las llantas. Dicho modelo posee las

propiedades volumétricas siguiente: masa 14,835 4 kg; volumen 0,001 854 43 m³; densidad 8 000 kg/m³; y peso 145,387 N. La sujeción del elemento se consideró fija.

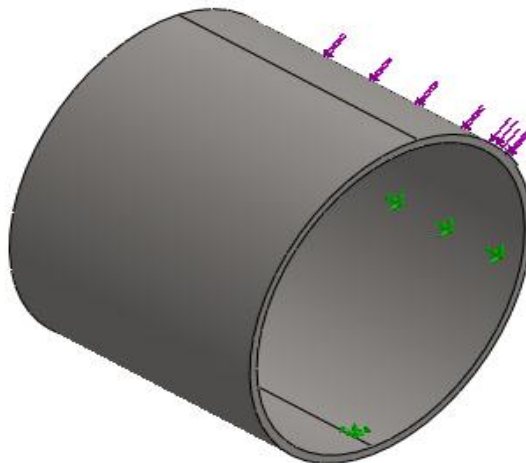


Figura 3.1. Modelo físico del casquillo en explotación.

En la tabla 3.3 se muestran las propiedades del material que constituyen a los casquillos que se modelan. La información que se indica en la tabla se definió en la modelación con el empleo de la biblioteca de materiales disponible en el software SolidWorks.

Tabla 3.3. Propiedades del material.

Nombre	AISI 321 Acero inoxidable recocido (SS)
Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
Criterio de error predeterminado	Tensión máxima de von Mises
Límite elástico	2,344e+008 N/m ²
Límite de tracción	6,2e+008 N/m ²
Módulo elástico	1,93e+011 N/m ²
Coeficiente de Poisson	0,27
Densidad	8 000 kg/m ³
Coeficiente de dilatación térmica	1,7e-005 /Kelvin

La tabla 3.4 muestra la información correspondiente a la malla empleada para la simulación. Dicha información se definió evaluando las posibilidades que ofreció el software y la importancia otorgada al proceso que se simula; se consideró el hecho de que a menor tolerancia en el mallado se gana en la precisión de los resultados pero hace más lento y complejo el proceso de cálculo.

Tabla 3.4. Propiedades del material.

Tolerancia	0,708 857 mm
Tamaño de elementos	14,1771 mm
Número total de nodos	15 862
Número total de elementos	7 864
Cociente máximo de aspectos	32,256
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	92,3
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	0,14

En la figura 3.2 se muestra el resultado del cálculo realizado en la simulación aplicando el criterio de la tensión de Von Mises. Se observa que la tensión que se genera en el modelo varía desde un mínimo de $6,028\ 53\text{e-}009\ \text{N/m}^2$ a un máximo de $4,032\ 25\text{e}+007\ \text{N/m}^2$ y que el límite elástico del material es de $234\ 421\ 748\ \text{N/m}^2$. A partir de la información indicada se infiere que el casquillo soporta los esfuerzos a los que está sometido puesto que el límite elástico del material es superior a la tensión máxima que se genera.

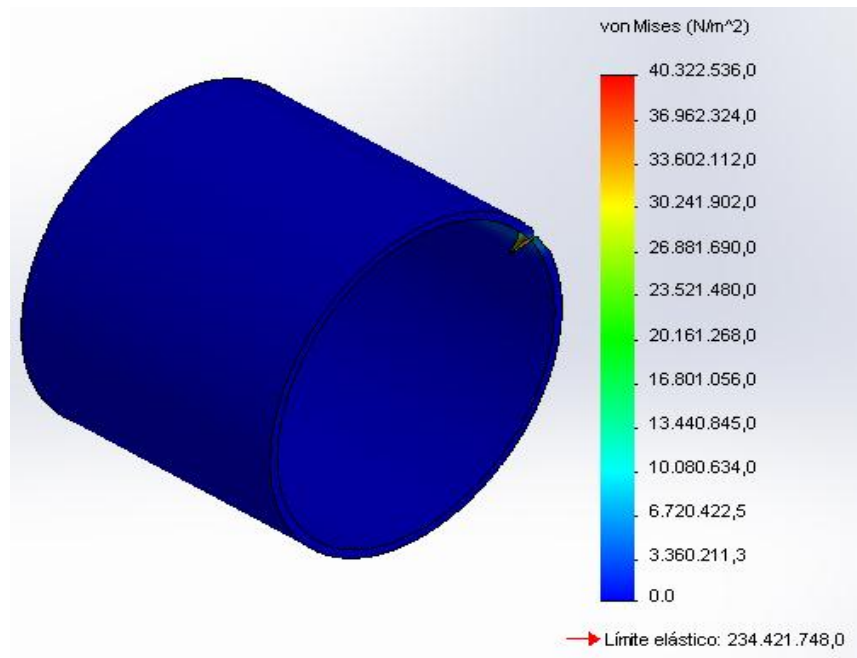


Figura 3.2. Modelo físico del casquillo en explotación

3.3.1. Chequeo del diseño sobre la base del factor de seguridad

Se procedió a la evaluación del diseño sobre la base del factor de seguridad aplicando el criterio de von Mises. Se determina que el coeficiente de seguridad adquiere el valor de 5,8 para el criterio de von Mises máxima, de lo que se infiere que el casquillo ofrece una buena fiabilidad según el criterio examinado.

3.4. Determinación de los parámetros de la tecnología de soldadura

A partir de la aplicación de la ecuación 2.12 a la 2.15 se determina el valor del carbono equivalente real y la temperatura de precalentamiento para el acero AISI 1045. Se obtiene que el carbono equivalente real es de 0,56 %, lo que indica la necesidad de realizar precalentamiento de acuerdo a lo reportado por Seferian (1962). El cálculo de la temperatura de precalentamiento arrojó un valor de 195 °C, lo cual está en correspondencia con el rango de temperatura especificado para el tratamiento (150 – 200 °C).

Verificación de los electrodos utilizados

La figura 3.3 muestra la ubicación en el diagrama de Schaeffler de los puntos correspondiente al cromo y el níquel equivalente para las uniones que se practicaron en el proceso de recuperación de los rodillos radiales del transportador Jacobi, los mismo se efectuaron siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo anterior. El punto uno se corresponde al depósito de soldadura que se produce entre el material base acero AISI 321 y el electrodo E 347-16, mientras que el punto dos se refiere al cordón de soldadura que se efectúa al unir los materiales base acero AISI 1045 y acero AISI 321 con un electrodo E 309 L-16.

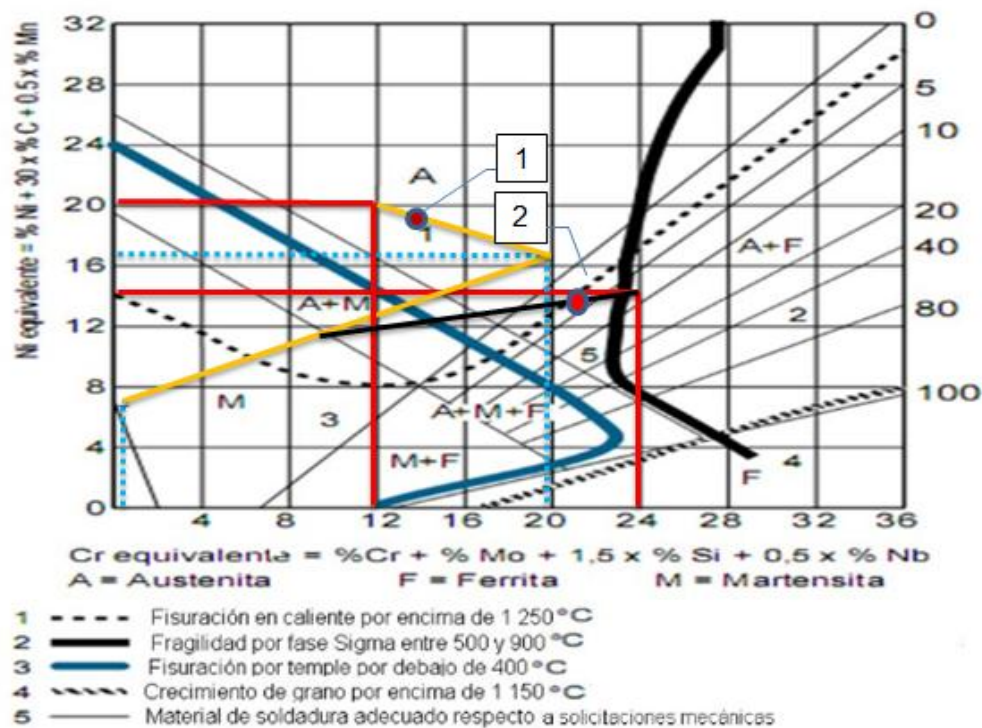


Figura 3.3. Determinación de la característica del cordón de soldadura.

En la figura anterior se observa que el cordón de soldadura correspondiente al punto uno (soldadura del casquillo), se caracteriza por la presencia de austenita y la ausencia de ferrita en su constitución, lo que da lugar a la ocurrencia de fisura en caliente por encima de 1 250 °C. Por otra parte en la misma figura se aprecia que el punto dos (soldadura de

casquillo y el rodillo) se corresponde con un depósito de soldadura que posee alrededor de 4,5 % de ferrita, lo que da una estructura con poca tendencia al agrietamiento, de acuerdo a lo reportado por Kocteki (2005).

Del análisis realizado anteriormente se infiere que el electrodo E347-16 es adecuado para la soldadura del casquillo puesto que este se puede trabajar a una temperatura muy inferior a 1 250 °C, y que el electrodo E309 L-16 asegura alta resistencia al agrietamiento. Para contribuir al aseguramiento de baja tendencia al agrietamiento se sugiere realizar la soldadura del casquillo con el empleo de un electrodo E 309 L-16 en lugar del utilizado, pues este deposita un cordón de soldadura con 5,5 % de ferrita, tal como se indica en la figura 3.4 (punto tres).

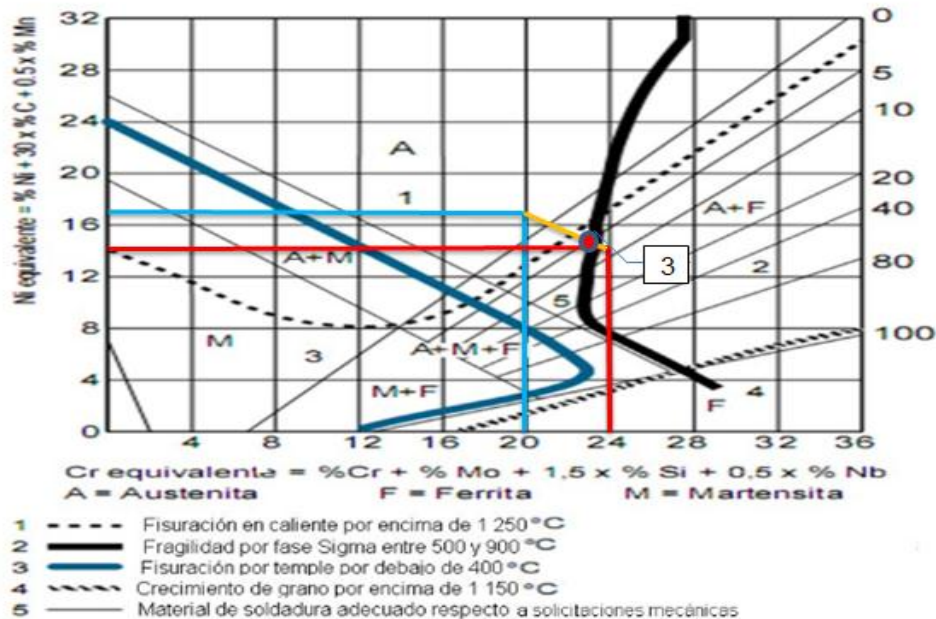


Figura 3.4. Característica del cordón de soldadura del acero AISI 321 con electrodo E309 L-16.

La tabla 3.5 muestra los parámetros del proceso de soldadura para la formación del casquillo y la unión de este con el rodillo, de acuerdo a las ecuaciones e indicaciones expuestas en el capítulo anterior. Los parámetros determinados constituyen un referente numérico importante para la elaboración de las cartas tecnológicas de soldadura relativa al

proceso de recuperación de los rodillos radiales objeto de estudio, con el empleo de un casquillo.

Tabla 3.5. Resultados de los parámetros del proceso de soldadura.

Parámetros de soldadura	Electrodo E347-16	Ecuación	Casquillo	Electrodo E309	Rodillo casquillo	Unidad de medida
Cantidad de electrodo	3,2 x 350	2.19	0,1	4,0 x 350	1,94	kg
	4,0 x 350		0,4			
Intensidad de la corriente	3,2 x 350		90 – 120	4,0 x 350	120 - 160	A
	4,0 x 350		120 - 150			
Tensión	3,2 x 350	2.22	25 – 35	4,0 x 350	25 - 35	V
	4,0 x 350		25 – 35			
Tiempo total de la soldadura		2.23	0,8		2,6	hr

En el anexo 9 se indican las cartas tecnológicas de soldadura relativa al casquillo y a la unión entre el casquillo y el rodillo. Dichos documentos constituyen la guía para la realización de la correspondiente soldadura.

3.5. Tecnología de maquinado para la recuperación del rodillo

En la tabla 3.6 se muestra los resultados de los parámetros determinados para el proceso de maquinado del rodillo desgastado, con arreglo a las ecuaciones y el procedimiento descrito en el capítulo anterior. Los valores obtenidos para cada parámetro se tienen en

cuenta en la confección de la correspondiente carta tecnológica y la elaboración de la ficha de costo.

Tabla 3.6. Parámetros de maquinado del rodillo desgastado.

Parámetros	Ecuación	Operaciones tecnológicas	Calculado	Corregido	UM
Número de revoluciones	2.32	Cilindrado de desbaste	76	63	rev/min
		Cilindrado de acabado	116	100	
		Biselado	79	63	
Profundidad de corte	2.33	Cilindrado de desbaste	4,3		mm
		Cilindrado de acabado	0,2		
		Biselado	5		
Cantidad de pasadas	2.34	Cilindrado de desbaste	3		
		Cilindrado de acabado	1		
		Biselado	4		
Avance	Tabla 1 del Anexo 3	Cilindrado de desbaste	0,4		mm/rev
		Cilindrado de acabado	0,1		
		Biselado	0,4		
Tiempo de maquinado total	2.35		58,58		min

La tabla 3.7 refiere los resultados de los parámetros calculados para el proceso de maquinado interior del casquillo. La operación se realiza en un torno 1 M 63 con el empleo

de una cuchilla de carburo metálico, cuyas características se muestran en la tabla 2, Anexo 4.

Tabla 3.7. Parámetros de maquinado interior del casquillo.

Parámetros	Ecuación	Operaciones tecnológicas	Calculado	Corregido	Unidad de medida
Número de revoluciones	2.32	Cilindrado de desbaste interior	68	63	rev/min
		Cilindrado de acabado interior	83	80	
Profundidad de corte	2.33	Cilindrado de desbaste interior	1,8		mm
		Cilindrado de acabado interior	0,2		
Cantidad de pasadas	2.34	Cilindrado de desbaste interior	5		
		Cilindrado de acabado interior	1		
Avance	Tabla 2 del anexo 3	Cilindrado de desbaste	0,4		mm/rev
		Cilindrado de acabado	0,1		
Tiempo de maquinado total	2.35		85		min

A continuación en la tabla 3.8 se muestran los resultados del cálculo efectuado para la determinación de los parámetros correspondiente a los pasos tecnológicos de cilindrado exterior y refrentado del conjunto rodillo casquillo. Además se realiza la corrección de los

valores obtenidos sobre la base de la característica del torno y la herramienta de corte utilizada.

Tabla 3.8. Parámetros de maquinado del rodillo y el casquillo ensamblado.

Parámetros	Ecuación	Operaciones tecnológicas	Calculado	Corregido	UM
Número de revoluciones	2.32	Cilindrado de desbaste exterior	63	63	rev/min
		Cilindrado de acabado exterior	80	80	
		Refrentado	66	63	
Profundidad de corte	2.33	Cilindrado de desbaste exterior	4,3		Mm
		Cilindrado de acabado exterior	0,2		
		Refrentado	3		
Cantidad de pasadas	2.34	Cilindrado de desbaste exterior	3		
		Cilindrado de acabado exterior	1		
		Refrentado	4		
Avance	Tabla 2	Cilindrado de desbaste	0,4		mm/rev
		Cilindrado de acabado	0,1		
		Refrentado	0,4		
Tiempo de maquinado total	2.35		66		min

El anexo 10 muestra las cartas tecnológicas del proceso de maquinado efectuado para la recuperación del rodillo desgastado con el empleo de un casquillo. Dichos documento constituye la guía para la realización de los correspondientes pasos tecnológicos relativos al maquinado.

3.6. Evaluación de los parámetros de control del rodillo y del casquillo

La tabla 3.9 muestra los resultados de las mediciones y del cálculo realizado relativo a los parámetros de control del ajuste seleccionado para el casquillo y el rodillo y de la superficie exterior del casquillo. Se escoge un nivel de confianza del 95 % para el establecimiento del estadístico crítico ($t_{crit.}$). Se realizan tres repeticiones para determinar la tendencia en el comportamiento del parámetro, con arreglo a la ecuación 2.36; para esto último la tarea consistió en definir la especificaciones de precisión y exactitud tal que se asegure un tamaño de muestra igual a tres, para un nivel de confianza del 90 % y asumiendo una desviación típica igual al error máximo de estimación se obtiene que el tamaño de la muestra necesario es de tres unidades.

Tabla 3.9. Parámetros de control del rodillo y el casquillo.

Parámetros	Mediciones	$\bar{X}$ y S	Rango de normalidad	Media μ	$t_{cal.}$	$t_{crit.}$
Diámetro exterior del casquillo, mm	304,41 - 305,04 - 304,44	304,63 0,36	306,16 – 303,10	304,84	-1,010	-4,303
Diámetro interior del casquillo, mm	295,2 – 294,4 – 295	294,87 0,42	296,66 – 293,08	294,62	1,031	4,303
Dureza, HB	108 – 140 - 158	135,33 25,32	244,30 - 26,36	404	-18,105	-4,303
Diámetro exterior del rodillo maquinado	295-295-294,35	294,78 0,38	296,40- 293,17	293,96	3,738	4,303

A partir de los resultados mostrados en la tabla anterior y teniendo en cuenta el procedimiento relativo al desarrollo de la prueba de hipótesis estadística planteado en el capítulo anterior se infieren las siguientes decisiones:

- El diámetro medio exterior del casquillo obtenido por medición no difiere significativamente del especificado en el plano, al nivel de confianza del 95 %, puesto que el valor de $t_{\text{calculado}}$ es mayor que el valor de $t_{\text{crítico}}$ (-1,010 es mayor que -4,303).
- El diámetro medio interior del casquillo obtenido por medición no difiere significativamente del especificado en el plano, al nivel de confianza del 95 %, puesto que el valor de $t_{\text{calculado}}$ no es mayor que el valor de $t_{\text{crítico}}$ (1,031 es menor que 4,303).
- La dureza media de la superficie exterior del casquillo obtenido por medición difiere significativamente de la especificada en el plano, al nivel de confianza del 95 %, puesto que el valor de $t_{\text{calculado}}$ es menor que el valor de $t_{\text{crítico}}$ (-18,105 es menor que -4,303).
- El diámetro medio exterior del rodillo maquinado, luego de haber sido desgastado, obtenido por medición no difiere significativamente del especificado en el plano, al nivel de confianza del 95 %, puesto que el valor de $t_{\text{calculado}}$ no es mayor que el valor de $t_{\text{crítico}}$ (3,738 es menor que 4,303).

De lo planteado anteriormente se infiere que la hipótesis de investigación formulada se acepta para el caso de las dimensiones que se obtienen al aplicar la tecnología, pero para la dureza superficial se rechaza. En otras palabras con la recuperación realizada del rodillo desgastado se logra restituir las dimensiones pero no la dureza superficial requerida.

3.7. Valoración económica

La esencia de la tarea o del problema ingenieril es el cambio o transformación de una situación o estado, o de la forma y el contenido a otro. En cualquier caso, para que haya problema ingenieril es imprescindible que existan múltiples variantes, las cuales no son igualmente ventajosas o evidentes, es decir, es necesario que exista más de una solución posible y que estas no sean evidentes. Al mismo tiempo, debe ser no sólo técnicamente correcta, sino económicamente racional y segura desde el punto de vista de la protección del individuo contra daños que limiten la integridad física, la

salud, o provoquen accidentes fatales y por extensión del medio que le rodea. Queda claro que además de los conocimientos técnicos, el ingeniero no puede prescindir de los conocimientos económicos que hacen de sus soluciones, la solución de un problema.

En la valoración económica pueden existir elementos perceptibles por una comunidad como perjuicio o beneficio, pero que al momento de su ponderación en unidades monetarias, sea imposible o altamente difícil materializarlo. En la economía contemporánea se hacen intentos, para llegar a aproximarse a métodos de medición que aborden los elementos cualitativos, pero siempre supeditados a una apreciación subjetiva de la realidad.

No contemplar lo subjetivo o intangible presente en determinados impactos de una inversión puede alejar de la práctica la mejor recomendación para decidir, por lo que es conveniente intentar alguna metódica que inserte lo cualitativo en lo cuantitativo.

En este trabajo se realiza la tecnología de recuperación de los rodillos radiales del transportador Jacobi, así como la verificación de parámetros de diseño. La metodología desarrollada permite realizar la valoración del estado del arte relativo al tema en cuestión, considerando los trabajos precedentes y tratando de poner de relieve los aspectos más distintivos de cada uno para aplicar la sugerencia oportuna. Se hace una caracterización de los materiales y métodos a emplear para la producción del conocimiento científico, teniendo como punto de referencia las normas y los principios científicos de la interrelación dialéctica teoría-práctica. Se plantea una valoración de los resultados obtenidos, poniendo de manifiesto la importancia de estos tanto en el plano conceptual como práctico.

En la tabla 3.10 se muestra los resultados del cálculo realizado para el análisis de las implicaciones económicas asociadas al proceso de recuperación de los rodillos radiales del transportador Jacobi con el empleo de un casquillo. Al observar la información contenida en la tabla anterior se infiere que resulta más factible desde el punto de vista económico recuperar los rodillos desgastados que fabricarlo, ya sea a partir de un semiproducto laminado o uno fundido.

Tabla 3.10. Costos de fabricación y recuperación de un rodillo.

Precios	Total	CUC	Fecha
Precio de un rodillo obtenido por fundición	7 188,46	3 455,01	6 – 06 -16
Precio de un rodillo obtenido por laminado	3 204,01	1 775,07	29 – 03 - 16
Precio de un rodillo recuperado con casquillo	505,74	244,57	7 – 06 -16

Las cifras referidas se obtuvieron a partir de las fichas de costos elaboradas en los correspondientes talleres de la empresa mecánica del níquel, teniendo en cuenta la información recogida en las respectivas cartas tecnológicas. A modo de evidenciar las informaciones contenidas en las referidas fichas de costos en el anexo 11 se muestran las fichas de costos elaborados para el proceso de recuperación de los rodillos.

La tecnología elaborada para el proceso de recuperación de los rodillos fue ejecutada en el taller de construcciones mecánica existente en la Empresa Productora de Níquel “Comandante Ernesto Che Guevara”, lo que permitió obtener una muestra de rodillo recuperado. La figura 3.5 y 3.6 ilustran el ejemplar de casquillo y del ensamble rodillo-casquillo respectivamente.



Figura 3.5. Casquillo exterior



Figura 3.6. Ensamble del rodillo y el casquillo.

El ensamble formado entre el rodillo y el casquillo constituye un recurso que se pone a disposición para la continuidad del proceso de investigación con vista al incremento de la longevidad del par cinemático llanta rodillo. Dicho elemento se pretende poner en explotación para evaluar en el tiempo su resistencia al desgaste, a juzgar por su periodo de vida útil en comparación con los que tradicionalmente se colocan como apoyo a las llantas.

3.8. Efectos ambientales

El conocimiento de la salud del medio ambiente es un factor esencial para la protección que cada hombre debe establecer sobre su entorno. El desarrollo impetuoso de las fuerzas productivas ha implicado el incremento de los riesgos de contaminación atmosférica, de la misma manera el desarrollo vertiginoso de la industria ha creado desechos, que durante un tiempo se pensó que se podrían depositar en basureros, bien en tierra o en mar sin causar ningún perjuicio. En la actualidad se comprende que estas acumulaciones no son más que el legado que se prepara para el futuro, que no tienen culpa alguna de la inmadurez del hombre para prever lo que podría pasar si continúa contaminando el entorno.

El término “contaminación atmosférica” hace referencia a fenómenos en la atmósfera que ocasionan daños, directa o indirectamente, a la salud humana, a los animales, a las plantas o a los materiales. Dado que el aire es el recurso natural que se necesita de una manera más inmediata, los fenómenos de contaminación atmosférica tienen una enorme trascendencia. La peligrosidad de estos fenómenos explica la necesidad de un control estricto de las emisiones de sustancias que puedan ser responsables de los mismos, de sus niveles en el medio ambiente atmosférico, y de la vigilancia de su evolución en el entorno.

3.8.1. Calentamiento en los procesos de soldadura

Las altas temperaturas de calentamiento durante los procesos de soldadura son potencialmente perjudiciales para el proceso y para el medio ambiente, ya que aceleran rápidamente los procesos de fusión del material de aporte, material base, revestimiento y fundentes, teniendo lugar durante este proceso la evaporación,

salpicaduras, y oxidación de los materiales y elementos que participan en las reacciones químicas de la zona fundida, que unidos a la acción del alto grado de salitre en el municipio y el monóxido de carbono, óxidos de azufre, amoníaco, entre muchas otras sustancias emitidas al medio producto de la actividad industrial, ya sea por escapes o emisión, son las responsables del deterioro del medio ambiente en el municipio y afectaciones a la salud del hombre.

A estas altas temperaturas las moléculas de oxígeno, nitrógeno e hidrógeno se descomponen parcialmente en átomos, alcanzando una actividad química mayor que en estado molecular y ocasionan la oxidación de los elementos, la saturación de la aleación con nitrógeno y la absorción de hidrógeno con más intensidad. La cantidad de oxígeno en el material de la costura depende de la influencia de la atmósfera de gas protector, la escoria y los elementos químicos de mayor afinidad que el hierro.

3.8.2. Afectaciones de los procesos de soldadura

Los trabajos de soldadura son bastante perjudiciales al medio ambiente, debido a la incidencia de las radiaciones, gases y altas temperaturas generados por el proceso. Los efectos contaminantes derivados de los procesos de soldadura son mucho más agresivos a la salud cuando las piezas a soldar están recubiertas de sustancias como: aceites, pinturas y otras; que se evaporan durante el proceso e inciden en el hombre junto a los gases de la soldadura y los del local, si en el mismo se realiza cualquier otra actividad que emita sustancias al medio.

En los diversos procedimientos de soldadura se originan sustancias nocivas. Especial importancia tienen el cromo y el níquel, por ser elementos carcinógenos y mutagénicos. Algunos elementos peligrosos están presentes en el humo generado en la soldadura en porcentajes superiores al 1 %, dando origen a riesgos para la salud.

Durante el proceso de soldadura también existe gran desprendimiento de gases y radiaciones que afectan al hombre, esto está dado principalmente debido a que el

soldador está protegido con su peto y demás medios de protección, pero las demás personas que participan en las labores no.

3.8.3. Afectaciones de los procesos de maquinado

Algunos de los procesos tecnológicos de producción que se deben estudiar y valorar cuidadosamente son los de elaboración de los metales por corte, mediante el torneado, fresado, taladrado, rectificado y acepillado. Operaciones que se ejecutan en casi todas las fábricas y talleres del país, y cuya influencia sobre el consumo energético y gasto de materiales es elevado.

En estas operaciones la productividad y calidad de las piezas que se elaboran, dependen, entre otros parámetros, del correcto cálculo y establecimiento de los elementos del régimen de corte. La alteración de alguno de estos elementos, además de afectar la productividad de piezas, así como, el acabado y precisión de las mismas, lo que traería como consecuencia es el incumplimiento de su asignación de servicio y afectaciones a otras piezas de las máquinas y mecanismos donde se instalan.

El proceso de maquinado produce gran cantidad de desechos sólidos y fluidos de corte, cuyas funciones especiales durante el mecanizado son refrigerar y lubricar, suelen contener un variado surtido de aditivos que le confieren propiedades tales como, estabilizar las emulsiones, inhibir la corrosión de piezas, herramientas y equipos de trabajo, estos desechos en forma de virutas al ser depositados en un lugar específico alteran el equilibrio del ecosistema allí presente; estos desechos en su composición poseen elementos, los cuales bajo la acción de las altas temperaturas y la lluvias pueden ser lixiviables pasando luego a contaminar las aguas subterráneas. También, la gran cantidad de energía eléctrica, que se consume en el taller la cual se toma de la red nacional se convirtió en gasto de combustible trayendo consigo la contaminación atmosférica debido al proceso de combustión de la termoeléctrica.

También estas máquinas herramientas en su funcionamiento provocan una gran contaminación sonora, provocando ruido, sonido que por su intensidad, duración o frecuencia, implica riesgo, molestia o daño para el oído humano u otro ser viviente.

3.9. Conclusiones del capítulo 3

1. Se efectúa la determinación de los parámetros del ajuste mecánico entre el casquillo y el rodillo, así como el análisis de la resistencia mecánica. Se determina un ajuste móvil con juego para las superficies acopladas sobre la base del sistema de eje único; y se infiere que el casquillo soporta los esfuerzos a los que está sometido puesto que el límite elástico del material es superior a la tensión máxima que se genera ($234\,421\,748\text{ N/m}^2$ es mayor que $40\,322\,500\text{ N/m}^2$) y el coeficiente de seguridad adquiere el valor de 5,8 para el criterio Von Mises máx.
2. Se determinó los parámetros de la tecnología para la recuperación del rodillo desgastado y se elaboran las cartas tecnológicas para el proceso de soldadura y maquinado. El análisis del carbono equivalente permitió determinar una temperatura de precalentamiento para el acero AISI 1045 de $195\text{ }^{\circ}\text{C}$. El diagrama de Schaeffler posibilitó ofrecer una garantía sobre la idoneidad de los electrodos utilizados y proponer al E 309 L-16 para practicar todos los cordones de soldadura necesarios en la tecnología de recuperación. Los regímenes de elaboración calculados fueron corregidos teniendo en cuenta las características de los materiales utilizados.
3. Se efectúa una prueba de hipótesis estadística relativa a la media de la dureza, del diámetro medio exterior e interior del casquillo, así como del diámetro exterior del rodillo; lo que permitió inferir que la dureza media de la superficie exterior del casquillo obtenido por medición difiere significativamente de la especificada en el plano, al nivel de confianza del 95 % y que se puede asumir la no existencia de diferencia significativas entre los valores de todos los diámetros medidos y los especificados en el plano, al mismo nivel de confianza(95 %).
4. Se efectúa una valoración de las implicaciones económicas y de los efectos ambientales asociados a los resultados del tema de investigación. Se infiere que

resulta más factible desde el punto de vista económico recuperar los rodillos desgastados que fabricarlo, puesto que la recuperación arroja un monto de efectivo igual a \$ 505,74 mientras que la fabricación las cifras de \$ 3 204,01 y \$ 7 188,46 para la obtención por laminado y fundición respectivamente. Las afectaciones de los procesos implicados en la recuperación están dadas por generación de calor, de sustancias nocivas a la salud, de desechos sólidos y de ruidos, así como altos consumos de energía.

CONCLUSIONES GENERALES

1. La revisión bibliográfica sobre los trabajos precedentes realizados con los rodillos radiales del transportador Jacobi y sobre el desgaste, permitió determinar que en ninguno de ellos se considera la recuperación de los rodillos desgastados con el empleo de un casquillo.
2. El análisis del ajuste mecánico entre el casquillo y el rodillo, así como su resistencia mecánica, posibilitó determinar un ajuste móvil con juego para las superficies acopladas sobre la base del sistema de eje único; y se infiere que el casquillo soporta los esfuerzos que está sometido puesto que el límite elástico del material es superior a la tensión máxima que se genera ($234\,421\,748\text{ N/m}^2$ es mayor que $40\,322\,500\text{ N/m}^2$) y el coeficiente de seguridad adquiere el valor de 5,8 para el criterio Von Mises máx.
3. El análisis del carbono equivalente permitió determinar una temperatura de precalentamiento para el acero AISI 1045 de $195\text{ }^{\circ}\text{C}$. El diagrama de Schaeffler posibilitó ofrecer garantía sobre la idoneidad de los electrodos utilizado y proponer al E 309 L-16 para practicar todos los cordones de soldadura necesarios en la tecnología de recuperación. Los regímenes de elaboración calculados fueron corregidos teniendo en cuenta las características de los materiales utilizados. Se elaboran las cartas tecnológicas para el proceso de soldadura y maquinado.
4. La prueba de hipótesis estadística relativa a la media de la dureza, del diámetro medio exterior e interior del casquillo, así como del diámetro exterior del rodillo; permitió inferir que la dureza media de la superficie exterior del casquillo obtenido por medición difiere significativamente de la especificada en el plano, al nivel de confianza del 95 % y la no existencia de diferencias significativas entre los valores de todos los diámetros medidos y los especificados en el plano, al mismo nivel de confianza(95%).
5. La valoración de las implicaciones económicas y de los efectos ambientales asociados a los resultados del tema de investigación, con lleva a inferir que resulta más factible desde el punto de vista económico recuperar los rodillos desgastados

que fabricarlo, puesto que la recuperación arroja un monto de efectivo igual a \$ 505,74 mientras que la fabricación las cifras de \$ 3 204,01 y \$ 7 188,46 para la obtención por laminado y fundición respectivamente; las afectaciones de los procesos implicados en la recuperación están dadas por generación de calor, de sustancias nocivas a la salud, de desechos sólidos y de ruidos, así como altos consumos de energía.

RECOMENDACIONES

1. Proponer a la Empresa Productora de Níquel “Comandante Ernesto Che Guevara” aplicar la tecnología de recuperación, de rodillos averiados, expuesta en este trabajo.
2. Evaluar la variante de un ajuste prensado para la unión entre el casquillo y el rodillo para determinar su factibilidad técnico económico respecto a la variante utilizada.
3. Utilizar el electrodo E 309 L-16 para practicar los cordones de soldadura, en la recuperación de los rodillos con el empleo de un casquillo, puesto que este asegura una buena resistencia, al agrietamiento, superior a la del E 347-16.
4. Realizar un control total de los parámetros del conjunto rodillo casquillo, que incluya análisis con líquido penetrante, verificación de la rugosidad, chequeo de la estructura metalográfica, entre otros.
5. Colocar en explotación el rodillo recuperado para evaluar, en el tiempo, su resistencia al desgaste, a juzgar por su período de vida útil en comparación con los que tradicionalmente se colocan como apoyo a las llantas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abad, H. Comportamiento microestructural de las capas en los pasadores de los equipos de laboreo minero. Tesis presentada en opción al Título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2009.
2. Aguilar, M. Diseño de una máquina tribológica para pruebas de desgaste abrasivo severo, Tesis de Maestría, SEPI ESIME IPN, México, febrero de 2002.
3. Alcántara et al. Influencia del desgaste abrasivo en los pasadores de esteras de los tractores KOMATSU D85P-21. Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Electromecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2008.
4. Alcántara, D. Comportamiento del desgaste en pasadores de equipos de laboreo minero fabricados de acero AISI 1045. Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Electromecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2012.
5. Álvarez, E; G, M. Estudio del comportamiento de factores que intervienen en el desgaste. Investigaciones científicas. UCLV. Año 20. N 2. Mayo-Agosto. 1995. pp: 69-76.
6. Álvarez, F. Caracterización del desgaste por fatiga. Tesis en opción al Título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2006.
7. Anuriev, V. S. "Manual del Constructor de Maquinarias". En tres tomos. Editorial Mashinoostroenie. Moscú, 1982.
8. Bäker, M. "An investigation of the chip segmentation process using finite elements" Technische Mechanik, Vol. 23 (1), pp.1-9, 2002.
9. Batista, Y. Evaluación de la tecnología de fabricación por fundición del rodillo del transportador rotatorio Jacobi. Tesis en opción al Título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2007.

10. Boada, O, Díaz, S., Campos, Y. "Estudio del estado físico-mecánico de superficies tratadas por deformación plástica superficial", Revista Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría (ISPJAE), Volumen 6, No. 2, Mayo-Agosto 2003, Cuba. ISSN1029-516X.
11. Bower, A F; Johnson, K L. The Influence of Strain Hardening on Cumulative Plastic Deformation in Rolling and Sliding Line Contact. J. Mech. Phys. Solids. Vol. 37, no. 4, pp. 471-493. 1989.
12. Buraya, D., Crystal Structure Analysis. Department of metallurgical and materials engineering. Materials science and engineering. 4 (3) 12 – 20, 2001. Disponible en la World Wide Web.
13. Burgos Solas, J. Tecnología de soldadura. Ed. Pueblo y Educación. 1987.
14. Cao, W. Teoría del comportamiento del desgaste de materiales. Tesis Maestría, SEPI ESIME IPN, México, agosto de 2004.
15. Cary, H., Modern Welding Technology, 4th ed. Prentice Hall. Ohio. USA. pp. 107-204, 1998.
16. Casanova N. Metrología e intercambibilidad. Departamento de tecnología del maquinado Facultad de construcción de maquinaria. La Habana. 299 p.
17. Caubet, J.J. "Teoría y Práctica Industrial del rozamiento". España, 1971.
18. Chen, Z; et al. (2000). Yield surfaces of fcc crystals with crystallographic slip and mechanical twinning. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. Vol.10. No.1. P.34-39. Disponible en la World Wide Web.
19. Conarco. "Catálogo general de consumibles para soldadura", (Buenos aire Argentina): Producción gráfica, 1988.
20. Courtney, W. Estudio del comportamiento del desgaste de materiales. Tesis Maestría, SEPI ESIME IPN, México, Agosto de 2000.
21. COX D. R. Planificación de Experimentos. John Wiley and Sons, Inc. New York, 1975.
22. Datsko, J., Material Properties and Manufacturing Processes. New York (EE.UU): John Wiley and Sons, 1991.

23. Díaz, L. Desgaste por rodadura en los pasadores de esteras de los tractores KOMATSU D 85 P – 21. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2007.
24. Easterling K. Introducción a la física metalúrgica de la soldadura. Heinemann, pp. 18-19. 1992.
25. Fernández, T.; Alcántara, D.; Rodríguez, I. Procesos metalúrgico y tecnológicos de soldadura. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa Dr: Antonio Núñez Jiménez Facultad de Metalurgia y electromecánica Departamento de Ingeniería Mecánica, 2004.
26. Fosca, C., Introducción a la metalurgia de la soldadura, Lima PUCP, cuarta edición, 2003.
27. González R.R. y Toscano J.M. Mediciones técnicas para la especialidad de Tecnología de Construcción de Maquinaria. Tomo I. Editorial UCLV. Santa Clara. 1983. 251 p.
28. Guliaev, A. Metalografía. Tomo I. Moscú. Editorial Mir. 1983. Pág. 53-8932.
29. Haber-Guerra, R.; Haber, R.; Peres, C; Alique, A.; Ros, S., "Model of the milling process on the basis of cutting force: A Neural network approach, Advances in Neural Networks and Applications (N. Mastorakis Ed.), Vol. I, 378-384, 2001.
30. Hernández, F. Metrología dimensional, 1986.
31. <http://euclid.ii.metu.edu.tr/~mete222/index.htm>.
32. Jennifer, A.; Armas, H.; Ciaccia, M., Comportamiento elastoplástico en tracción de láminas de acero ASTM A – 569. Revista Ingeniería UC. 14 (1) 57 – 63, 2007.
33. John, E., "Handbook of comparative world steel standards". ASTM, p 669, 2004.
34. Kalpakjian, S.; Schmid, S. "Manufactura, ingeniería y tecnología" Pearson Educación. ISBN: 970-26-0137-1 Versión en español de la obra Manufacturing Engineering and Technology, Fourth Edition", 2002.

35. Kórsakov, V., Fundamentos de la tecnología en la construcción de maquinaria. Editorial Mir. Moscú. 1987. 390 p.
36. Kotecki, D.; Lippold, J. 2013. Welding metallurgy and Weldability of Stainless Steels. J Journal of Materials Processing and Technology. Versión 1. Pp. 474-483.
37. Kuroda, M.; Tvergaard, V., Forming limit diagrams for anisotropic metal sheets with different yield criteria. Int. J. Solids Structures. 37 (45) 5037 – 5059, 2000.
38. Leyva, B. Diagnóstico y pronóstico de las fallas de los rodillos del transportador Jacobi. 2014. Revista Minería y Geología. Disponible en <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/>.
39. Leyva, B. Tolerancia dimensional en pasadores elaborados de acero AISI 1045 deformados por rodadura. Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Electromecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2012.
40. Leyva, B. Variación de la dureza superficial de los rodillos radiales del transportador Jacobi. 2014. Revista Nexo. Disponible en <http://revistas.uni.edu.ni/index.php/Nexo>.
41. Leyva, Y. Verificación de la rugosidad superficial de los rodillos radiales del transportador Jacobi. Tesis presentada en opción al título ingeniero mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2013.
42. Leyva., B; Fernández., T; Rodríguez., I; Alcántara., D y Oliveros, Y. Comportamiento de la tolerancia dimensional en piezas cilíndricas de acero AISI 1045 durante la deformación plástica superficial con rodillo simple. VI conferencia internacional de aprovechamiento de recursos minerales. CINAREM 2011. Noviembre 2011.
43. Martínez, F. Martínez, H. Adaptación de máquinas pulidoras para ensayos de desgaste abrasivo. Revista construcción de maquinaria. Santa Clara. No 1: 47-55. 1981.

44. Martínez, F., et al. Tecnología de los metales. Tomo II. Editorial MES. Ciudad Habana. 299 p.
45. Meyer, H. J. Grietas Laminares en Construcciones Soldadas. II Conf. On Significance of Defect in Welds, Welding Inst. London. 2001.
46. Miller et al. Probabilidad y Estadística para Ingenieros, 2005.
47. Molina, C. Tolerancias, ajustes y medición de longitudes y ángulos. Tomo I. Editorial Pueblo y Educación. 1983. 77 p.
48. NC 16-30: 1980 S.U.D.P. "Ajustes y tolerancias"
49. Oliveros, E. Desgaste de los rodillos radiales del transportador sinfín para minerales lateríticos. Tesis presentada en opción al Título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2011.
50. Oriol Guerra, José M. "Conferencia de Máquinas Transportadoras", (Ciudad de la Habana): Editorial Pueblo y Educación, 1988.
51. Oxley, P. "Mechanics of machining—an analytical approach to assessing machinability" Ellis Horwood Limited, London, 1989.
52. Pérez, A. Evaluación del desgaste de los rodillos radiales del transportador Jacobi. Tesis presentada en opción al Título ingeniero mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2015. 70 Pág.
53. Pero-Sanz, J. A et al: Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Madrid: DOSSAT, 2000.
54. Poll, Y. Determinación del comportamiento de la dureza superficial de los rodillos radiales del transportador Jacobi. Tesis presentada en opción al Título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2014.
55. Prieto, R. Caracterización de las fallas de los rodillos radiales del transportador Jacobi. Tesis presentada en opción al Título de Ingeniero Mecánico. Instituto

- Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2013.
56. Rodríguez, A. Desgaste en cojinetes de deslizamiento. Tesis en opción al Título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2003.
57. Rodríguez, A. Procesos y equipos de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", 2006.
58. Rodríguez, A. Solidificación en piezas fundidas de acero de medio contenido de carbono del tipo 55 Г. Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Electromecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2008.
59. Sabinet, R. Caracterización del desgaste en elementos fabricados de materiales AISI 1045. Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Electromecánica. Universidad Central de Las Villas, No. 4, Octubre-Diciembre 2005. ISSN 0253-5757.
60. Sagaró *et al.* Comportamiento al desgaste abrasivo del acero 65 Mn 4, con y sin tratamiento térmico, empleado en los martillos de molino. Tesis en opción al Título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2007.
61. Sánchez, Y. Tecnología de fabricación de los rodillos radiales del transportador rotatorio Jacobi. Proyecto 1 de ingeniería mecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2014. 47 pág.
62. Sandvik Coromant., Catálogo de herramientas, 2007.
63. Sarache, L. Diseño de Experimentos y Análisis Multifactorial Aplicado a la Industria. Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida. Venezuela. 585 – 590. 2001.
64. Sawalhi y Randall. Caracterización del desgaste en elementos fabricados de materiales AISI 1045. Tesis presentada en opción al Título Académico de

- Máster en Electromecánica. Universidad Central de Las Villas, No. 4, Octubre-Diciembre 2008. ISSN 0253-5757.
65. Schijve, J., Fatigue of structures and materials. Editorial Kluwer, Academic Publishers Dordrecht, pp 160 – 17, 2004.
 66. Schmitt-Braess, G., Haber-Guerra, R.; Haber, R. y Alique A., "Multivariable Circle Criterion: Stable Fuzzy Control of Milling Process", Proceedings of IEEE Conference on Control Applications, Glasgow, Scotland, UK. 2002.
 67. Séférian D. "Metalurgia de la soldadura". Editorial tecnos, 1962.
 68. Shigley, J. E. Diseño en Ingeniería Mecánica. Editorial McGraw Hill, 1990.
 69. Software Materiales 2000.
 70. Surian, M.; Ramini, R.; Vedia, L., Influence of Molybdenum on Ferritic strength SMAW All-Weld-Metal Properties, Welding Journal, Supplement Research, 84, 53s-62s, 2005.
 71. Tomacén A. caracterización del desgaste en el sistema biela – manivela del automóvil Hunday. Tesis presentada en opción al título ingeniero mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2010.
 72. Trent, E. Wright, P. "Metal Cutting" Butterworth-Heinemann, 225 Wildwood Avenue, Woburn, 2000.
 73. Vélez, R, Hernández, V. Cálculo de probabilidades I. Madrid: UNED; 1995.
 74. Verdeja, L, González, R. El desgaste de materiales en el crisol de horno alto: conceptos generales. Revista de minas. Madrid: No 13 -14, 1996.