

UNIVERSIDAD DE CIENTFUEGOS
"CARLOS RAFAEL RODRIGUEZ"



**TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO ACADÉMICO DE
MASTER EN CIENCIAS.**

*Titulo: Desarrollo de un Nuevo Método para la Fabricación
y Recuperación de Cojinetes de Deslizamiento por Prensado
en Caliente de Polvos de Bronce bajo Fuerzas Dilatométricas.*

AUTOR: *Ing. Eredis Benavides Jiménez*

TUTOR: *Dr. Luis M. Castellanos González.*

Cienfuegos, 2009

DECLARACIÓN DE AUTORÍA:

El presente trabajo realizado en La Universidad de Cienfuegos perteneciente al municipio de Cienfuegos, como parte de la culminación de los estudios: Maestría en Ingeniería Mecánica, autorizo, por los derechos que me concede ser el autor del mismo a que sea utilizado por la Universidad para fines que contribuyan a su desarrollo, tanto en forma parcial como total. Además no podrá ser presentado en eventos, ni publicado sin mi aprobación.

Firma del autor

Los abajo firmantes certifican que el presente trabajo ha sido revisado según acuerdos de la dirección de nuestro centro y que el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura, referido a la temática señalada.

Información Científica – Técnica

Nombres y Apellidos

Informático

Nombres y Apellidos

Firma del tutor

INDICE

Página

Resumen

Introducción.	1
Capítulo I. Estado Actual del Arte.	4
1.1. La Pulvimetalurgia.	4
1.1.1. Aspectos generales.	4
1.1.2. Etapas fundamentales del proceso de obtención de piezas por pulvimetalurgia.	4
Prensado en Caliente.	
1.1.3. Lugar de la pulvimetalurgia en la producción de piezas y materiales.	11
1.1.4 Factores que justifican la utilización de la pulvimetalurgia como tecnología de fabricación y/o recuperación de piezas.	12
1.2. Tribología.	13
1.2.1. Historia y antecedentes.	13
1.2.2. Tipos de fricción.	15
1.2.3. Tipo de lubricaciones y sus características.	16
1.2.4. Determinación experimental del desgaste. Métodos e indicadores fundamentales.	17
1.2.5. Sistemas automatizados. Bujes porosos auto-lubricados.	19
1.3. Cojinetes de deslizamiento.	21
1.3.1. Clasificación según la dirección de la carga que soportan los cojinetes de deslizamiento.	21
1.3.2. Materiales para cojinetes.	22
1.3.2.1. Materiales metálicos para cojinetes antifricción.	23
1.3.3. Causas y manifestaciones de la pérdida de capacidad de trabajo de las superficies antifricción en cojinetes de deslizamiento	26
Capítulo II. Método de Prensado en Caliente bajo Fuerzas Dilatométricas.	28
2.1. Esencia física del método. Expresiones de Cálculo para cojinetes cilíndricos y planos.	28
2.1.1. Cojinetes cilíndricos.	28
2.1.2. Cojinetes planos.	31
2.2. Selección de los materiales.	33
2.3. Obtención de los moldes.	33
2.4. Intercambiabilidad y productividad de los dispositivos.	36

2.5. Horno con Atmósfera Neutra.	38
2.6. Tecnología de recuperación y fabricación de cojinetes por “Pulvimetalurgia Dilatométrica”.	41
2.7. Ventajas del prensado en caliente por “Pulvimetalurgia Dilatométrica”.	42
Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.	43
3.1. Optimización del Proceso.	43
3.1.1 Metodología de Superficies de Respuesta.	43
3.1.2. Condiciones de realización de los ensayos. Ejecución del plan experimental.	50
Procesamiento estadístico de los resultados.	
3.2. Interfase de Níquel Químico.	57
3.2.1 Propiedades del depósito de Níquel Químico.	58
3.2.2. Tecnología de Níquel Químico.	61
3.2.3. Resultados del análisis químico de la tecnología utilizada.	62
3.3. Procesos de Acabado. Tratamientos por deformación plástica superficial.	62
3.3.1. Bruñido por rodillo.	65
3.3.2. Operaciones Post Sinterizado.	67
3.4. Diseño, construcción y montaje de una instalación para la impregnación en aceite.	68
3.5. Tribología. Ensayos.	70
3.6. Resultados de la recuperación y fabricación de los cojinetes de deslizamiento por prensado en caliente bajo fuerzas dilatómicas.	77
3.6.1. Ensayos experimentales.	77
3.6.2. Ensayos de banco.	78
Capítulo IV. Análisis de Factibilidad Técnico Económico de la Tecnología.	80
4.1. Generalidades del Cálculo Económico.	80
4.2. Análisis de factibilidad técnico económica.	81
4.3. Análisis de sensibilidad.	82
Conclusiones	83
Recomendaciones	85
Bibliografía	86
Anexos	94

RESUMEN

Este trabajo surge como una tarea de Forum y de la ANIR por una necesidad manifiesta de reducir importaciones, y darle solución a la recuperación y fabricación de cojinetes de deslizamientos cilíndricos y planos mediante un novedoso método desarrollado por un colectivo de trabajadores del área de Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la U. C. F denominado “Pulvimetalurgia Dilatométrica”. A partir de la idea y los primeros resultados obtenidos se inicia un Proyecto Nacional de Ciencia y Técnica (PNCT) aprobado y financiado por el CITMA para buscar solución a una de las líneas de investigación del país.

Se presenta la esencia del método de obtención de una fina capa de bronce sobre un sustrato metálico, aprovechando la reducción de una cavidad donde se aloja el polvo sobre el sustrato de acero, como consecuencia de la diferencia entre los coeficientes de dilatación lineal de los dos aceros inoxidables utilizados como moldes o matrices.

Una vez comprobada la idea esencial del nuevo método, el Prensado en caliente bajo fuerzas dilatométricas de los moldes o “Pulvimetalurgia Dilatométrica”, se diseñan los moldes para su aplicación en la recuperación de cojinetes trimetálicos de deslizamiento de biela y apoyo de motores de combustión interna. Así como de la recuperación de cojinetes planos de base cobre de las bombas hidráulicas NSH-50 de las combinadas cañeras.

Se desarrolla un método de fabricación de cojinetes cilíndricos Acero-bronce con una interfase de Níquel Químico.

Se presentan los resultados de un conjunto de tareas científicas para la obtención de productos con la calidad técnica y económica requeridos, entre los que están:

1. La construcción de un sistema de atmósfera neutra.
2. La impregnación en aceite de cojinetes.
3. El bruñido por rodillo.
4. Estudio tribológico comparativo.
5. Desarrollo de moldes de mayor productividad.

Además del estudio tribológico, se hacen pruebas de dureza, de adherencia, análisis microestructural y evaluación de la difusión del Níquel como interfase del cobre y el hierro por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).

Se presentan los resultados de la validación del método en las pruebas de campo y se hace un análisis económico de la factibilidad de su aplicación.

La esencia del método, lo que constituye el principal aporte como innovación tecnológica de invención, fue registrado por la Oficina Cubana de la Propiedad Industrial con certificado No. 22966 tomo 001; folio 01, del 2004.

INTRODUCCION

El estudio de los procesos de conformado y del comportamiento de los diferentes tipos de materiales para las operaciones correspondientes está en pleno desarrollo en el mundo. Se necesitan más que antes ingenieros e investigadores dedicados a esta problemática con una buena preparación teórico – práctica, ya que el grupo de materiales metálicos sigue representando una parte muy importante en el consumo mundial de materiales.

Las difíciles condiciones económicas, comerciales y financieras que enfrenta Cuba a partir de la desaparición del campo socialista soviético, el recrudecimiento del bloqueo norteamericano, la actual crisis económica y financiera mundial, así como la necesidad de un uso óptimo y racional de los recursos en la lucha por el desarrollo sostenible, han determinado la tendencia hacia la recuperación de piezas como clave del funcionamiento de la industria y la agricultura cubana.

Este trabajo surge como una tarea de Forum y de la ANIR por una necesidad manifiesta de reducir importaciones, y darle solución a la recuperación y fabricación de cojinetes de deslizamientos cilíndricos y planos mediante un novedoso método desarrollado por un colectivo de trabajadores del área de Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la U. C. F denominado “Pulvimetalurgia Dilatómetrica”. A partir de la idea y los primeros resultados obtenidos se inicia un Proyecto Nacional de Ciencia y Técnica (PNCT) aprobado y financiado por el CITMA para buscar solución a una de las líneas de investigación del país.

En Cuba este método puede ser utilizado en la recuperación de cojinetes de deslizamiento en equipos pesados o ligeros, entre ellos combinadas cañeras, etc., fundamentalmente en los sectores del MINAZ y el MINAGRI. En el país no se conocen estudios sobre el tema en la comunidad científico – técnica y existen reportes en otros países, pero se aplica el conformado en frío.

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se plantea el **problema científico** siguiente:

La necesidad de obtener una fina capa de bronce sinterizado sobre sustratos metálicos, cilíndricos y planos, a partir del prensado en caliente de polvos metálicos por la reducción de una cavidad (donde se aloja el polvo) durante el calentamiento, como consecuencia de la diferencia entre los coeficientes de dilatación lineal de los aceros inoxidables (moldes) con el fin de recuperar y fabricar cojinetes de deslizamiento.

Las hipótesis trazadas son las siguientes:

- 1- Es posible obtener una fina capa de bronce sinterizado sobre un sustrato metálico mediante el prensado en caliente de polvos por la reducción de una cavidad bajo las fuerzas de dilatación lineal entre dos aceros inoxidables (moldes) con diferentes coeficientes de dilatación lineal.
- 2- Es posible aprovechar el prensado en caliente de polvos de bronce bajo fuerzas dilatómetricas sobre un sustrato metálico para desarrollar un método de recuperación de la capa de bronce de cojinetes de deslizamiento con una porosidad admisible (entre el 10% y el 30%) y la fabricación de cojinetes acero-bronce con una interfase de níquel químico.

Los objetivos que persigue este trabajo han sido resultado de Premios Provinciales del CITMA, premios en eventos nacionales e internacionales, 15 Trabajos de Diploma, una patente y en este trabajo de Maestría se resume el método desarrollado y un conjunto de resultados científico técnicos.

Objetivo General:

Obtención y validación de un método para la recuperación y fabricación de cojinetes de deslizamiento por prensado en caliente de polvos de bronce sobre un sustrato metálico bajo las fuerzas dilatómetricas de los moldes.

Objetivos Específicos:

- 1- Obtención de un nuevo método denominado “Pulvimetalurgia Dilatómetrica” para la recuperación de cojinetes cilíndricos y planos.
- 2- Desarrollar la tecnología para la recuperación de cojinetes cilíndricos y planos base cobre, mediante la “Pulvimetalurgia Dilatómetrica”.
- 3- Desarrollar la tecnología de fabricación de cojinetes cilíndricos trimetálicos mediante la “Pulvimetalurgia Dilatómetrica” colocando una interfase de níquel químico en el sustrato de acero.
- 4- Desarrollar un conjunto de soluciones para el perfeccionamiento del método y elevación de la calidad del producto.
 - Optimizar el proceso de recuperación y fabricación de cojinetes.
 - Lograr moldes de mayor productividad.
 - Impregnar en aceite los cojinetes.
 - Bruñido por rodillo como acabado final.

- 5- Estudiar el comportamiento tribológico de los cojinetes obtenidos por “Pulvimetalurgia Dilatométrica” con los importados.
- 6- Evaluar los resultados con pruebas de campo.
- 7- Analizar económicamente la tecnología desarrollada.

La Tesis tiene estructurado cuatro capítulos, que coinciden con los momentos fundamentales de la investigación:

El Capítulo I: Estado Actual del Arte, donde se abordan los elementos relacionados con el marco teórico, como se trata el tema en la literatura.

El Capítulo II: Método de Prensado en Caliente bajo Fuerzas Dilatométricas, expone en que consiste el método, diseño de los moldes, materiales utilizados y tecnología de recuperación y/o fabricación de piezas, ventajas y desventajas.

En el Capítulo III: Conjunto de Soluciones Para el Perfeccionamiento de la Tecnología, se muestran un grupo de soluciones que ponen a punto el método desarrollado.

El Capítulo IV: Análisis de Factibilidad Técnico Económica de la Tecnología, resume los gastos incurridos en la investigación, así como plantea los análisis de factibilidad técnico económica, y de sensibilidad en la introducción de la tecnología.

Finalmente aparecen las Conclusiones y las Recomendaciones como resultado del trabajo y los Anexos que recogen datos, tablas, gráficos, fotografías, imágenes, entre otros aspectos que sirven de apoyo en la fundamentación del trabajo presentado.

CAPITULO I. Estado Actual del Arte.

1.1. La Pulvimetalurgia.

1.1.1. Aspectos generales.

El uso de los metales en polvos se remonta a varios centenares de años atrás, pero fue apenas en el siglo pasado que, debido a avances tecnológicos de la segunda guerra mundial, se crea la industria de la pulvimetalurgia. Desde entonces y gracias a sus continuos avances y la calidad y utilidad de sus productos ha crecido más rápidamente que cualquier otro proceso de manufactura de piezas metálicas.

La pulvimetalurgia es la técnica que agrupa los métodos de obtención de polvos y la producción a partir de estos de piezas metálicas sin la fusión del componente básico. Su objetivo fundamental es transformar sin fundir los polvos de metales, no metales o aleaciones metálicas usando presión y calor, a través de un tratamiento térmico llamado sinterización, que sustituye la fusión clásica y que se realiza a temperatura inferior a la del punto de fusión del metal base.

La metalurgia de los polvos permite obtener productos acabados con una homogeneidad y precisión dimensional superior a las obtenidas por otras técnicas, y ofrece además la posibilidad de economizar materia prima y energía.

1.1.2. Etapas fundamentales del proceso de obtención de piezas por pulvimetalurgia.

En la obtención de piezas por pulvimetalurgia se observan cuatro etapas fundamentales:

1. Obtención del polvo metálico.
2. Obtención de los moldes.
3. Conformación.
4. Sinterización.

Obtención del polvo metálico y su preparación.

Todo el proceso de la industria de la metalurgia de polvos tiene su comienzo con los procesos por el cual se fabrican los polvos metálicos. Existe gran variedad de procesos para producir polvos de metales, a continuación se muestran los tres más importantes, estos manejan la mayor cantidad de producción de polvos metálicos.

- Reducción a Estado Sólido (Solid State Reduction): Este proceso ha sido, por mucho tiempo el más utilizado para la producción de polvo de hierro. La materia prima seleccionada es aplastada, mezclada con carbón y pasada por un horno continuo en donde reacciona. Este proceso deja una especie de torta esponjada de hierro. Después se aplasta nuevamente, se separan los materiales no metálicos y se tamiza para producir el polvo. Debido a que no se hace ninguna refinación, la pureza del polvo es totalmente dependiente de la pureza de la materia prima. Este mismo proceso se puede utilizar para hacer polvo de cobre.
- Electrólisis: Escogiendo las condiciones apropiadas - posición y fuerza del electrolito, corriente, densidad, temperatura, etc., muchos metales pueden convertirse en polvos metálicos. Este proceso puede requerir de otros procesos (secado, aleado, lavado, etc.) para lograr las propiedades deseadas. Se usa por lo general para producir polvo de cobre, pero también se puede utilizar para la producción de polvo de cromo y manganeso. Dos de las mayores cualidades de este proceso son la alta pureza y la alta densidad alcanzada en los polvos.
- Atomización: En este proceso, el metal fundido es separado en pequeñas goteras que luego son congeladas rápidamente antes de que entren en contacto entre ellas o con una superficie sólida. El principal método para desintegrar la delgada corriente de metal fundido es el de someterla al impacto de fuertes golpes de gas (se usan comúnmente aire, nitrógeno y argón) o de líquido (generalmente agua). Variando diferentes parámetros del proceso se puede controlar el tamaño de las partículas.

En principio la técnica es aplicable para todos los metales que se puedan fundir pero es comercialmente utilizada para la producción de polvos de hierro, cobre, aceros, bronce, aluminio, plomo y zinc.

Además de estos tres procesos, hay varios que están obteniendo una creciente aceptación, debido a sus aplicaciones, ejemplo representativo de estos métodos son los procesos de: Electrodo Rotatorio y Trituración Mecánica.

El Proceso de Electrodo Rotatorio tiene la gran ventaja de que se puede ejecutar en envases cerrados, con atmósfera controlada e inclusive en el vacío, con esto se obtiene un polvo muy puro y limpio, además permite trabajar con metales altamente reactivos.

El Proceso de Trituración Mecánica tiene gran aplicabilidad en la producción de polvos extremadamente finos. Esto se alcanza con la pulverización mecánica en un molino de bolas. Para este proceso se acostumbra utilizar como materia prima metales que ya hayan sido pulverizados. La finura de los polvos producidos por este método, le ha representado un incremento en su uso sobre todo para la fabricación de polvos finos para el moldeo por inyección (Método nuevo de la metalurgia de polvos).

Características de los Polvos.

Los futuros procesos y el resultado final alcanzado después del sinterizado están altamente ligados con las características del polvo tales como: tamaño de la partícula, forma de las partículas, estructura y condición de la superficie. Una de las propiedades más importantes de los polvos es la Densidad Aparente; esto se debe a que la dureza alcanzada en el compactado depende directamente de la Densidad Aparente. A su vez esta característica depende de la forma y de la porosidad promedio de las partículas.

Una vez se tiene el polvo empieza el proceso de fabricación de la pieza deseada. Este proceso está compuesto por básicamente tres etapas - la mezcla, el compactado y la sinterización. Cada una de estas etapas contribuye en las características finales de la pieza.

Antes de pasar los polvos a los procesos posteriores de elaboración es necesario que estos obtengan determinadas propiedades físicas, químicas y tecnológicas, las principales operaciones para esto son: recocido, clasificación y mezclado.

En la etapa del mezclado se debe alcanzar una mezcla homogénea de los materiales y añadir el lubricante. La principal función del lubricante es la de reducir la fricción entre el polvo metálico y las superficies de las herramientas utilizadas en el proceso. Además, el lubricante debe deslizarse durante la compactación, y así ayudar a conseguir una densidad uniforme en todo el compactado. De igual importancia resulta el hecho de que la reducción de fricción también ayuda a la eyección del compactado minimizando la posibilidad de formación de grietas. Se debe tener gran cuidado en la escogencia del lubricante, debido a que una mala escogencia puede resultar en efectos adversos en las durezas del compactado antes y después de sinterizar. Otra precaución que se debe tener en esta etapa del proceso es la de no sobre mezclar. El sobre mezclar aumenta la densidad aparente de la mezcla y reduce la dureza de la pieza antes del sinterizado.

Conformación.

En el caso más general la conformación es la acción de darle forma, medidas, densidad y resistencia mecánica a una cantidad determinada de polvo (al producto de esta operación se le llama comprimido o pieza en verde) para posteriormente obtener una pieza o material dado.

La conformación, definida simplemente, es la obtención de un cuerpo relativamente consolidado por medio de la acción de fuerzas sobre una cantidad determinada de polvo que ha sido vertido en un molde. Como resultado de esto se obtendrá un comprimido, de volumen menor que el inicial.

La mezcla es introducida en un molde de acero o carburo rígido y presionada para obtener la forma deseada. La presión a la cual se somete la mezcla durante esta etapa es de 150-900 MPa. La mezcla debe ser presionada lo suficiente para que soporte la fuerza de la eyección del molde y que pueda ser movida antes del sinterizado. El compactado es una etapa muy importante ya que la forma y las propiedades mecánicas finales de la pieza están fuertemente relacionadas con la densidad al presionar. Debido a que los polvos metálicos bajo presión no se comportan como líquidos, la presión no es transmitida uniformemente por el molde y hay virtualmente cero flujo lateral. Por esto, la obtención de buenas densidades en la pieza depende en un alto grado del diseño de la herramienta que aplica la presión. Las siguientes son consideraciones que se deben tener en cuenta al diseñar una herramienta para el compactado.

- Relación entre longitud y ancho. La presión aplicada y, por ende, la densidad decrece a lo largo de la pieza. La compactación de doble lado (se aplica presión por los dos lados de la mezcla) mejora la distribución de la presión pero sigue dejando una región en la mitad de la pieza con menos densidad. Por esto relaciones entre largo y ancho de piezas superiores a 3:1 no son recomendadas.
- Cambios bruscos en las secciones se deben omitir, debido a que producen más estrés, lo que puede llevar a fracturas en la pieza.
- La complejidad en la forma de la pieza y el número de operaciones de presión que se necesitan entran en juego para la velocidad en que se puede fabricar una pieza.

La energía de la conformación se consume en: la fricción entre las partículas al acomodarse, entre las partículas y las paredes del molde y en la deformación de las partículas.

- La fricción entre los granos del polvo y las paredes del molde reduce progresivamente la transmisión de presión y por lo tanto la densidad obtenida a lo largo de la pieza. Estos efectos se pueden minimizar con la ayuda de buenos lubricantes.
- La curva de densidad vs. presión aplicada sigue una relación hiperbólica. Por esta relación se debe buscar la presión a la que la densidad es óptima ya que una mayor presión presentaría un efecto negativo en la densidad.

El compactado del polvo a temperaturas normales y sin un ambiente controlado es muy útil, por su bajo costo, para la fabricación de muchas piezas; sin embargo tiene grandes limitantes en materia de la densidad del compactado. Por esta razón se han desarrollados varios métodos que mejoran esta y otras propiedades del compactado, como es el caso de la compactación semi-caliente (Warm Compaction).

La compactación semi-caliente nos permite aumentar la densidad del compactado considerablemente con un costo extra muy bajo. Este método utiliza la maquinaria y el polvo metálico que se usa en el proceso convencional. Lo único que requiere es que la mezcla, el molde y toda la herramienta utilizada para la compactación sea calentada a una temperatura de 130–1500°C. Un lubricante que permite bajar su porcentaje en peso en la mezcla a sólo 0.6 % fue desarrollado para poder realizar la compactación semi-caliente. Además existe un incremento significativo en la fuerza del compactado, reduciendo así los riesgos de daño en su manejo. Al usar este método y una vez la pieza es sinterizada la resistencia de la pieza es incrementada más o menos en un 10% y consigue un cambio dimensional casi de cero.

De acuerdo al esquema de conformación, puede usarse el método continuo (la introducción de la carga a la zona de conformación no está relacionada con la cantidad de ciclos de conformación: ejemplo: laminación y extrucción de polvos) o el método discontinuo (la cantidad de ciclos de introducción de la carga es igual a los ciclos de conformación: ejemplo; prensado en moldes cerrados con simple o doble compresión, prensado isostático, prensado a alta velocidad, conformado en licor).

Sinterización.

Luego de ser obtenido el comprimido, este debe recibir un posterior calentamiento, por lo general en hornos, que le permitan terminar la consolidación y obtener una pieza con determinadas propiedades mecánicas. A esta operación se le denomina sinterización.

La sinterización es el proceso de establecimiento de los enlaces Inter-partículas y la obtención de las propiedades del material mediante el calentamiento de un polvo comprimido o vertido libremente, sin que se funda el componente base, y es clave para el proceso de la metalurgia de polvos. Es aquí en donde la pieza adquiere la resistencia y fuerza para realizar su función ingenieril para la cual se ha fabricado. El término Sinterizado tiene la siguiente definición: “Es el tratamiento térmico de un polvo o compactado metálico a una temperatura inferior a la temperatura de fusión de la base de la mezcla. Tiene el propósito de incrementar la ‘fuerza’ y las resistencias de la pieza creando enlaces fuertes entre las partículas”.

Para describir este proceso basta con decir que ocurre una difusión atómica y las partes unidas durante el proceso de compactación se fortalecen y crecen hasta formar una pieza uniforme. Esto puede inducir a un proceso de Recristalización y a un incremento en el tamaño de los granos. Los poros tienden a volverse redondos y la porosidad en general como porcentaje del volumen total tiende a decrecer. Esta operación, casi siempre, se lleva a cabo dentro de un ambiente de atmósfera controlada y a temperaturas entre el 60 y 90% de la temperatura de fusión del mayor constituyente. Cuando hay mezcla de polvos, hay ocasiones en donde el proceso de sinterización se efectúa a una temperatura superior a la de fusión de uno de los constituyentes secundarios como en partes estructurales de Hierro/Cobre, Carburo de Tungsteno/Cobalto, etc. Al hacer el proceso a una temperatura superior a la temperatura de fusión de un constituyente, se está haciendo un sinterizado con presencia de fase líquida. Por esto es esencial controlar la cantidad de fase líquida que se presenta durante el proceso para poder asegurar paridad en la forma de la pieza.

Se debe llevar un control sobre la intensidad del calentamiento, el tiempo, la temperatura y la atmósfera para obtener resultados que puedan ser reproducidos en la tecnología de la pulvimetalurgia para obtener una pieza consolidada y resistente.

Temperaturas de Sinterizado:

Materiales Grados °C.

Hierro / Acero 1100 – 1300 °C

Aleaciones de aluminio 590 – 620 °C.

Cobre 750 – 1000 °C.

Latón 850 – 950 °C.

Bronce 740 – 780 °C.

Metales Duros 1200 – 1600 °C.

El sinterizado puede realizarse de 2 formas fundamentalmente:

Sinterizado-Endurecimiento: Se hace el tratamiento térmico del sinterizado y después se somete a un bajón de temperatura rápidamente. Esto se puede realizar gracias a los avances tecnológicos que se han logrado en los hornos para sinterizado que permiten descender la temperatura a velocidades hasta de 500 °C/seg. El resultado de esta operación en las piezas de acero es una estructura homogénea martensítica. Además de este excelente resultado también se obtienen tolerancias dimensionales muy precisas. Estas dos propiedades adquiridas durante el proceso de Sinterización-Endurecimiento nos permiten obviar varios procesos de post sinterización.

Sinterizado en Vacío: Este tipo de sinterizado es un tipo especial de sinterizado con atmósfera controlada y desde el punto de vista científico es probablemente la mejor. El vacío, en este proceso es difícil de mantener; haciendo que el Sinterizado en vacío sea casi imposible de automatizar elevando los costos. Este proceso es estándar para algunas aplicaciones especiales y raras (aunque su número se incrementa rápidamente) que demandan el trabajo en vacío, se usa para Sinterizar aceros y metales de alta aleación.

Operaciones Post Sinterizado.

- **Re-Compactar:** Es casi inevitable que las piezas sufran un cambio dimensional en el sinterizado. Para contrarrestar este efecto negativo y en algunos casos para incrementar la densidad de la pieza, se usa el Re-Compactar. Como su nombre lo indica consta de volver a compactar la pieza, devolviéndole sus dimensiones iniciales y aumentando la densidad (sólo se aumenta un poco). Esta última propiedad es vital para cuando se necesitan piezas con propiedades mecánicas óptimas, en estos casos también se recomienda volver a hacer un Sinterizado.
- **Infiltración:** Este es un método para mejorar la resistencia de materiales porosos que consiste en llenar los poros superficiales con un metal líquido que tenga menor punto de fusión. No necesita presión y se usan bastante con piezas ferrosas y utilizando cobre como infiltrante. Este método también es utilizado para producir materiales compuestos con propiedades eléctricas especiales como Tungsteno/Cobre y Molibdeno/ Plata.
- **Impregnación:** Este término es análogo al de infiltración pero en vez de llenar los poros con materiales metálicos se utilizan materiales orgánicos. El ejemplo más representativo de este procedimiento son los cojinetes impregnados con aceite.

Además de los tratamientos de post Sinterizado anteriores, se le pueden hacer a la pieza los tratamientos térmicos conocidos: tratamientos con vapor, tratamientos mecánicos, endurecimientos superficiales, etc.

1.1.3. Lugar de la Pulvimetalurgia en la producción de piezas y materiales.

La producción de piezas y nuevos materiales constituye una necesidad de nuestro país para consolidar su desarrollo tecnológico. Paralelamente esta producción debe responder, desde el punto de vista técnico-económico, a los adelantos que se han obtenido en los últimos años en el desarrollo de las modernas tecnologías. Una de las vías para cumplir este objetivo es la introducción de piezas y materiales utilizando como materias primas básicas los polvos, tecnología denominada Pulvimetalurgia.

Al abordar el tema del futuro de la metalurgia de los polvos, o lo que es lo mismo, la tendencia en los próximos años, en los países menos desarrollados, no se puede dejar de considerar dos serias restricciones a cualquier proceso tecnológico: por un lado el aspecto financiero y por otro la limitada cantidad de energía disponible en la mayoría de estos países.

Esta versatilidad para aplicar diferentes tratamientos a las piezas que salen del proceso de pulvimetalurgia le da una gran ventaja a este método de fabricación de piezas. Aunque la pulvimetalurgia tiene su mayor uso con metales comunes, también tiene aplicaciones con otros tipos de materiales:

1. Los metales refractarios, metales con alta temperatura de fusión, son muy difíciles de producir llevándolos a la temperatura de fusión y luego moldeándolos. Algunos de estos metales son el Tungsteno, el Molibdeno y el Tantalio.
2. Los materiales compuestos:
 - Materiales para contacto eléctrico tales como Cobre / Tungsteno, Plata / Óxido de Cadmio.
 - Metales duros, usados para herramientas de corte y forjado de metales. Estos incluyen Ni, Ni-Co, Ni-Cr, en general superaleaciones en base de Níquel y aceros complejos.
 - Herramientas de corte especial hechas de diamante dispersado en una matriz metálica.
3. Los materiales porosos, los mayores productos de este grupo de materiales son los filtros y los bujes auto-lubricados. Este último producto es difícilmente, sino imposible, fabricarlo por cualquier otro método de metalurgia.

4. Las Partes Estructurales (o Mecánicas) mayormente constituidas por Hierro pero tienen además aleaciones con Cobre, Latón, Bronce y Aluminio. También se pueden fabricar piezas hechas con materiales más raros como el Titanio o Berilio.
5. Aleaciones para alto trájín, aceros para trabajos que requieran mucha velocidad de funcionamiento y herramientas muy especializadas.
6. Los CERMETS (combinación de metales y cerámicos), con la resistencia de los metales o aleaciones y la resistencia a la abrasión y al calor de los compuestos metálicos. Los CERMETS tienen diferentes aplicaciones como en aparatos químicos resistentes a la corrosión, equipo para energía nuclear, bombas para servicios severos y sistemas para manipular combustible de cohetes. Este proceso abarca la preparación de los polvos y su conformación por prensado en caliente en artículos útiles. En forma básica un polvo de metal se compacta en forma deseada y se calienta para reforzar el compacto por sinterizado.
7. Polvos de metal. Las composiciones más usadas son los polvos en base de cobre o de hierro, latón y acero para partes estructurales, bronce para cojinetes. Otros de importancia aunque en cantidades menores son: acero inoxidable, aluminio, titanio, níquel, estaño, tungsteno, cobre, zirconio, grafito y óxidos metálicos y carburos. Se usan polvos de metal puro para ciertas partes y aleaciones para otras. Estas últimas pueden obtenerse aleando un metal antes del pulverizado y por el mezclado de polvos de los ingredientes deseados.

1.1.4. Factores que justifican la utilización de la pulvimetalurgia como tecnología de fabricación y/o recuperación de piezas.

A continuación se relacionan algunos factores que justifican la utilización de la pulvimetalurgia como tecnología de fabricación y/o recuperación de piezas:

Ventajas

1. El proceso de metalurgia de polvos utiliza la materia prima más eficientemente que la mayoría de los otros procesos (fundición, conformado, maquinado y otros).
2. Con el uso de esta tecnología el consumo de energía generalmente es menor que en los procesos competitivos.
3. Los componentes pueden obtenerse con estrechas tolerancias dimensionales, necesitando poco o ningún maquinado posterior.

4. La versatilidad del método, que permite elaborar numerosas piezas de distintas configuraciones, y de formas complejas, bajo el mismo principio.
5. El costo de producción de un nuevo componente es menor para el proceso de metalurgia de los polvos que para otros procesos de producción.

Desventajas.

1. Elevado costo de las matrices de compactación.
2. Características mecánicas inferiores debido a la porosidad del material.
3. Limitaciones de diseño: sección uniforme en la dirección de compactado, esbeltez limitada, etc.

1.2. Tribología.

1.2.1. Historia y antecedentes.

La Tribología podría parecer algo nuevo, pero es sólo la percepción, ya que el interés en temas relacionados con la disciplina existe desde antes de que la historia se escribiera. Como un ejemplo, se sabe que las “brocas” realizadas durante el periodo Paleolítico para perforar agujeros o para producir fuego, eran “fijados” con rodamientos hechos de cornamentas o huesos.

Los documentos históricos muestran el uso de la rueda desde el 3500 A.C., lo cual ilustra el interés de nuestros antepasados por reducir la fricción en movimientos de traslación. Los egipcios tenían el conocimiento de la fricción y los lubricantes, esto se ve en el transporte de grandes bloques de piedra para la construcción de monumentos y pirámides. Para realizar esta tarea utilizaban agua o grasa animal como lubricante.

El artista científico renacentista Leonardo Da Vinci fue el primero que postuló un acercamiento a la fricción. Da Vinci dedujo la leyes que gobernaban el movimiento de un bloque rectangular deslizándose sobre una superficie plana, también, fue el primero en introducir el concepto del coeficiente de fricción. Desafortunadamente sus escritos no fueron publicados hasta cientos de años después de sus descubrimientos. En el año 1699 el físico francés Guillaume Amontons redescubrió las leyes de la fricción al estudiar el deslizamiento entre dos superficies planas.

Muchos otros descubrimientos ocurrieron a lo largo de la historia referentes al tema, científicos como Charles Augustin Coulomb, Robert Hooke, Isaac Newton, entre otros, aportaron conocimientos importantes para el desarrollo de esta ciencia.

Al surgir la Revolución Industrial el desarrollo tecnológico de la maquinaria para producción avanzó rápidamente. El uso de la potencia del vapor permitió nuevas técnicas de manufactura. En los inicios del siglo veinte, desde el enorme crecimiento industrial hasta la demanda de una mejor tribología, el conocimiento de todas las áreas de la tribología se expandió rápidamente

La tribología es la ciencia y tecnología que estudia la **lubricación, la fricción y el desgaste** de partes móviles o estacionarias. La lubricación, la fricción y el desgaste tienen una función fundamental en la vida de los elementos de máquinas.

El término tribología viene del griego **tribos**, que significa frotamiento o rozamiento y **logía** que viene de ciencia, por tanto la traducción literal será “**la ciencia del frotamiento**”.

La mayoría de las consecuencias de la fricción y el desgaste se consideran negativas, tales como el consumo de energía y la causa de las fallas mecánicas, sin embargo existen beneficios fundamentales de la fricción y el desgaste, ejemplo: (la interacción del neumático y el piso por ejemplo o el zapato y el suelo), sin los cuales trasladarse sería imposible.

La fricción sirve como el mecanismo de conexión inherente en los nudos, los clavos y el conjunto tuerca tornillo.

El esfuerzo de diseño no solo debe ser menor que el esfuerzo permisible y la deformación no debe exceder ningún valor máximo, sino que la lubricación, la fricción y el desgaste (consideraciones tribológicas) también deben ser apropiadamente comprendidas para que los elementos de máquinas se diseñen con éxito.

Es reconocida como fuente de gran potencial para economizar recursos financieros además de la preservación de activos físicos, materias primas y recursos energéticos. También como una ineludible forma de hacer Mantenimiento Proactivo en equipos y maquinarias.

Como en la resistencia de materiales, la tribología es la base para cada diseño de ingeniería de elementos de máquinas, casi ningún elemento de máquina prescinden de consideraciones tribológicas.

Dentro de los tres grupos inherentes que comprende trataremos inicialmente a la lubricación que es el que justamente nos interesa más, en otras palabras como tratar los efectos que produce la fricción, el desgaste y en consecuencia el remedio es una visión proactiva hacia una lubricación racional y efectiva.

El estudio de los sistemas tribológicos, compuestos al menos por dos cuerpos en contacto y el llamado tercer cuerpo que conforma el medio ambiente del par, se realiza en los planos funcionales, técnicos mecánicos o de trabajo y de materiales. En general el sistema intercambia con el exterior masa (trabajo) y energía térmica (calor) en esos planos.

1.2.2. Tipos de fricción.

Existen varios tipos de fricción, según el criterio de clasificación: fricción externa o interna, fricción estática o dinámica, fricción de deslizamiento, por rodadura o por rodadura y deslizamiento.

La fricción externa es un fenómeno de naturaleza dual, mecánico-molecular. La fuerza de resistencia al movimiento relativo se compone de la resistencia, la deformación de las capas superficiales externas penetradas por las irregularidades, y de la resistencia debida a las interacciones moleculares en los sectores suficientemente próximos de los cuerpos en contacto. Por tanto, la fricción está acompañada de intensa deformación de las capas superficiales del cuerpo menos rígido del par y de interacciones moleculares de los sólidos en la superficie de separación.

Atendiendo a la existencia o no de lubricante en la superficie de contacto de los elementos que forman el par tribológico, la fricción puede ser: **seca** (no existe capa alguna de lubricante en las superficies de contacto), **límite** (en la interfase existe una capa fluida adsorbida, del orden de 0.1×10^{-3} mm de espesor, pero no es una capa masiva de lubricante capaz de soportar la carga), y **fluida** (las superficies de los materiales están separadas por una capa de lubricante que impide el contacto entre ellas, pues la presión en el lubricante equilibra las cargas externas).

En el caso de la lubricación fluida la resistencia al movimiento se debe únicamente a la fricción interna en la película lubricante determinada por su viscosidad. Este régimen de fricción es el óptimo para pares tribológicos desde el punto de vista de las pérdidas energéticas, durabilidad y resistencia al desgaste.

El coeficiente de fricción (f) se define convencionalmente como la razón entre la fuerza de fricción (F_f) y la fuerza normal (F_n) que surge durante el trabajo del par.

$$f = \frac{F_f}{F_n}$$

Los valores comunes del coeficiente de fricción son de 0.2 a 0.8 para la fricción seca, de 0.005 a 0.02 para el régimen límite y de 0.001 a 0.03 para la fricción fluida. El valor de (f) depende de la capa lubricante, la magnitud de la presión de contorno, la naturaleza y las propiedades mecánica de los materiales, la rugosidad de la superficie en contacto y la temperatura de los cuerpos que forman el par.

El desgaste es un fenómeno permanente asociado a la fricción y puede definirse como un proceso de pérdida progresiva de sustancia en la superficie de trabajo, resultado del movimiento relativo, que modifica las propiedades, dimensiones y formas de los elementos, y por tanto la estructura del sistema. Para definir unívocamente el tipo de desgaste es necesario conocer:

- 1- El tipo de movimiento relativo: deslizamiento, rodadura, choque, vibraciones, etc.
- 2- Los elementos interactuantes y su estado de agresión.
- 3- El mecanismo fundamental de desgaste: por fatiga superficial, abrasivo, adhesivo, corrosivo-mecánico.

Estas características determinan el tipo de desgaste. Para una descripción cuantitativa deben considerarse además:

- 1- El trabajo aplicado al sistema, conociendo la fuerza normal, el coeficiente de fricción y la trayectoria o recorrido de fricción.
- 2- Las propiedades del material.
- 3- Intensidad del desgaste.
- 4- Las características de la superficie rosante.

La manifestación diferenciada de un solo tipo de desgaste es posible sólo en casos especiales, y normalmente lo que se observa es una combinación de mecanismos de desgastes.

El proceso de desgaste es mínimo en el régimen de fricción fluida, y algo mayor en la fricción límite, donde existe algún tipo de lubricante.

1.2.3. Tipo de lubricaciones y sus características.

La lubricación tiene como propósito separar la superficie en movimiento relativo por una película de material lubricante, capaz de soportar esfuerzos cortantes ofreciendo solo una pequeña resistencia y sin deterioro superficial. En dependencia del espesor de la capa lubricante, de la altura de las

irregularidades de la superficie y del grado de ajuste geométrico, pueden presentarse en diversos regímenes de lubricación.

1. Lubricación hidrodinámica o elastohidrodinámica (E.H.D).
2. Lubricación parcialmente elastohidrodinámica o mixta.
3. Lubricación fronteriza o límite.

La condición obligatoria para la fricción fluida es el suministro abundante y continuo de aceite. La presión en la película de aceite es indispensable para soportar la carga actuante y prevenir el contacto entre las superficies mecánicas. Este proceso autosostenido de creación de presión en la película de aceite se denomina **lubricación hidrodinámica**. Se caracteriza por la ausencia de contacto entre metales, el establecimiento de una película de aceite continua, bajo coeficiente de fricción, mínima las pérdidas por rozamiento y por desprendimiento de calor en el cojinete e inexistencia de desgaste de las superficies metálicas.

En condiciones de **lubricación mixta** se rompe la continuidad de la película de aceite y las superficies del árbol y del cojinete hacen contacto sus microirregularidades en sectores de mayor o menor extensión. Este tipo de rozamiento tiene lugar cuando el suministro de aceite es insuficiente o no existe mecanismo de lubricación hidrodinámica.

También durante el arranque y parada de M.C.I puede existir en el par cojinete-árbol la **lubricación límite**, en la cual ambos cuerpos hacen contacto por toda la superficie o por sectores de gran extensión. Se carece de la capa de aceite separadora, pues el lubricante se encuentra en la superficie metálica solo en forma de película adsorbida. De ser sostenido este régimen por problemas en el mecanismo de lubricación hidrodinámica, se producirá el calentamiento del par, la fusión del revestimiento y el agarramiento del cojinete.

1.2.4. Determinación experimental del desgaste. Métodos e indicadores fundamentales.

La clasificación más general de los métodos experimentales de determinación del desgaste los divide en: Métodos Periódicos y Métodos Continuos.

1. Los métodos continuos permiten la determinación de los valores absolutos del desgaste sin necesidad de detener el funcionamiento de la máquina en la cual se esté estudiando la resistencia al desgaste de un par tribológico. Los más empleados son: determinación por el contenido de productos del desgaste en los lubricantes usados o de desechos; usando

isótopos radiactivos; mediante micrometrage neumático; utilizando indicadores de carátula; empleando tensómetros inductivos; mediante micrometrage tensométrico, etc.

2. Los métodos periódicos son generalmente comparativos del estado de la muestra antes y después de ser sometida a ensayo durante cierto período de tiempo. De ellos los más utilizados son: mediante micrometrage; por diferencia de peso; perfilográfico; base a medidas artificiales (con muchas variantes: por huellas, punzonado, barrenado, muescas, copiado, etc.).

Indicadores del Desgaste:

Los indicadores del desgaste son características numéricas que permiten cuantificar los valores absolutos del desgaste y dependen del método experimental empleado para ello. Los fundamentales son:

1- Desgaste gravimétrico (Wg): caracteriza la pérdida de masa que ha tenido lugar durante el período de desgaste. Se determina como:

$$Wg = G_o - G_f \quad (g)$$

Donde:

G_o - peso inicial de la muestra (g).

G_f - Peso final de la muestra (g).

2- Intensidad gravimétrica de desgaste (Ig): es la relación entre el desgaste gravimétrico (Wg) y el recorrido de fricción que lo produce (Sf). Se calcula por:

$$Ig = \frac{Wg}{Sf} \quad \left(\frac{g}{Km}\right)$$

3- Desgaste lineal (Wh): caracteriza la variación de dimensiones de la pieza en dirección perpendicular a la superficie de contacto. Se determina como:

$$Wh = h_o - h_f \quad (mm)$$

Donde:

h_o - dimensión inicial (mm).

h_f -dimensión final (mm).

4- Intensidad lineal del desgaste (I_h): es la relación entre el desgaste lineal (W_h) y el recorrido de fricción que lo produce (S_f). Se calcula por:

$$I_h = \frac{W_h}{S_f} \quad \left(\frac{mm}{km} \right)$$

5- Desgaste volumétrico (W_v): caracteriza la variación del volumen de las piezas durante el desgaste de las mismas. Se determina como:

$$W_v = V_o - V_f \quad (mm^3)$$

Donde:

V_o - Volumen inicial (mm^3)

V_f - Volumen final (mm^3)

6- Intensidad volumétrica del desgaste (I_v): es la relación entre el desgaste volumétrico (W_v) y el recorrido de fricción que lo produce (S_f). Se calcula por:

$$I_v = \frac{W_v}{S_f} \quad \left(\frac{mm^3}{km} \right)$$

7- Intensidad relativa de desgaste: este parámetro refleja la relación entre el desgaste de un material en estudio (m_e) y el desgaste de un material patrón (m_p) durante el proceso de ensayo o trabajo, expresados en términos gravimétricos, lineales o volumétricos:

$$I_r = W_g \text{ mp} / W_g \text{ me}$$

$$I_r = W_h \text{ mp} / W_h \text{ me}$$

$$I_r = W_v \text{ mp} / W_v \text{ me}$$

Nota: En caso de que se ensayen el material de estudio y el patrón en diferentes recorridos de fricción, los cocientes de las ecuaciones 1 y 3 deberán considerar las intensidades de desgaste y no el valor absoluto de desgaste.

1.2.5. Sistemas automatizados. Bujes porosos auto-lubricados.

Desde la década de 1920, los bujes porosos auto-lubricados eran aplicados. Esos materiales eran una de las más antiguas aplicaciones comerciales de productos de la metalurgia de polvos. Las grandes ventajas de esos bujes porosos son, que la porosidad actúa como una reserva de aceite lubricante en

el sistema. Esto posibilita que cuando no se haya establecido el régimen de lubricación hidrodinámica, que es el deseado, los sectores de contacto son menores y con ello disminuye el desgaste.

Cuando los poros son impregnados con aceite este comprende cerca del 25 % del volumen del material. Cuando un conjunto de mecanismos contiene un buje poroso autolubricado y este entra en servicio por la rotación del eje donde se encuentra el buje, este movimiento relativo provoca un aumento de la temperatura, el aumento de la temperatura provoca que el aceite se retire de los poros debido a su menor coeficiente de dilatación comparado con el del material y debido a la presión hidrodinámica la película de aceite se forma entre el eje y el buje. Cuando la rotación se interrumpe el buje se enfría, el aceite se reabsorbe por capilaridad.

De ese modo en la mayoría de estos casos, con este principio no se pierde el aceite contenido en los poros, durante todo el ciclo de vida del mecanismo. En algunos casos cuando los mecanismos se proyectan para servicios más pesados, se proyecta un conjunto de mecanismos con reservas de aceite adicional y en este caso se incluye dispositivos adicionales.

Propiedades de los bujes porosos auto-lubricados.

- Compatibilidad química con el lubricante.
- Conductividad térmica para la disipación del calor.
- Propiedades mecánicas que permitan mantener la estructura y resistencia a los esfuerzos de ajustes y formas de montajes.
- Características anti-excoriación y resistencia al desgaste.

Principales tipos de aleación empleados en la fabricación de buje auto-lubricados:

- Bronces.
- Hierro y hierro al carbono.
- Hierro-cobre
- Bronce diluido.
- Hierro-grafito.

En este caso nos referimos a los bronce por ser las aleaciones más empleadas por sus propiedades de excelente resistencia a la corrosión, a los esfuerzos del montaje y su capacidad de soportar carga de servicio. La composición más empleada corresponde al 90 % de cobre y 10 % de estaño, con una

adición de grafito de un 1 % para facilitar la fabricación del mecanismo y mejorar sus propiedades de lubricación.

1.3. Cojinetes de deslizamiento.

Los cojinetes tienen como finalidad apoyar los árboles y ejes giratorios en el espacio, para que estos puedan girar o rodar y soportar cargas que obran sobre los mismos. Además de árboles y ejes, apoyar las piezas que giran alrededor de estos, por ejemplo, las poleas piñones, etc.

Los cojinetes según la clase de fricción se clasifican en cojinetes de **deslizamiento** (fricción) y de **rodamiento**.

Los cojinetes de deslizamiento son los apoyos de piezas giratorias, que trabajan en condiciones de deslizamiento relativo de la superficie del gorrón sobre la superficie del cojinete, separados por una capa de lubricante.

1.3.1. Clasificación según la dirección de la carga que soportan los cojinetes de deslizamiento:

- **Cojinetes Radiales:** Son aquellos que están diseñados para soportar cargas que inciden en sentido perpendicular al eje del árbol (cargas radiales).
- **Cojinetes Axiales:** Son aquellos que soportan cargas en la dirección del eje (cargas axiales).
- **Cojinetes mixtos:** Soportan a la vez cargas radiales y axiales.

Las propiedades antifriccionales de los pares en rozamiento se determinan en la combinación de los materiales del árbol, del cojinete y del lubricante.

Debido a que el costo de los cigüeñales y otros árboles principales es mayor que el de los cojinetes de deslizamiento, ellos han de desgastarse menos que estos últimos. Los cojinetes trabajan tanto mejor cuanto más alta es la dureza de los gorriones o muñones del árbol, los que como regla se someten a temple y alcanzan durezas HRC 55-60. Para lograr un par antifricción correcto, el muñón y el cojinete no solo deben tener distinta dureza, sino que además deben ofrecer un bajo coeficiente de rozamiento y no poseer afinidad físico-química.

1.3.2. Materiales para cojinetes.

A los materiales para cojinetes se le plantean exigencias complejas que garanticen su capacidad de trabajo:

1. Poder antifricción. Se caracteriza por el coeficiente de rozamiento en el par con el material del gorrón del árbol y por la temperatura en la superficie de contacto.
2. Resistencia al desgaste.
3. Resistencia a la fatiga.

Para asegurar estas exigencias complejas, son importantes las siguientes particularidades de los materiales para cojinetes:

1. Buenas cualidades antifricción, es decir, bajo coeficiente de rozamiento, buena resistencia al desgaste, ninguna tendencia a la soldadura, capacidad de asentamiento durante la fase inicial de trabajo, etc.
2. Conductividad térmica, que asegure una intensiva extracción de calor desde la superficie de rozamiento, y bajo coeficiente de dilatación lineal para evitar grandes variaciones de holguras de los cojinetes.
3. Aptitud para la adaptación funcional, que permite reducir las presiones locales y de arista, que se deben a las deformaciones elásticas y a los errores de fabricación.
4. Buena humectabilidad con el aceite y capacidad para formar sobre las superficies películas de aceite resistentes y de rápida reconstitución.
5. Resistencia a la corrosión.
6. Bajo módulo de elasticidad.
7. Buenas propiedades tecnológicas (de fundición, sinterización, elaboración por corte, etc).

Al buen trabajo del material antifricción contribuye la estructura caracterizada por una matriz plástica con componentes más duros incorporados.

Según su composición química, los materiales antifricción pueden clasificarse en tres grupos principales:

1. Materiales metálicos: babbits, bronce, aleaciones a base de zinc, de aluminio, fundiciones antifricción, etc.
2. Materiales de cerámica metálica.
3. Materiales no metálicos: plásticos, madera, goma, etc.

En el caso de los cojinetes de deslizamiento para motores de combustión interna, son prácticamente exclusivos los materiales antifricción metálicos, que se tratarán a continuación.

1.3.2.1. Materiales metálicos para cojinetes antifricción.

Los grupos fundamentales de materiales metálicos para superficies antifricción incluyen:

I- Los babbits:

Los babbits al estaño se utilizan para trabajo a altas velocidades y presiones, de hasta $200 \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$ a fin de evitar la fusión del babbitt estos se emplean a temperaturas inferiores a 110 °C. Permiten un desgaste mínimo del muñón del árbol. Sus inconvenientes principales son: resistencia a la fatiga relativamente baja que limita su empleo en motores de combustión interna, e imposibilidad de recubrir en capas finas a causa de la presencia de cristales gruesos.

Actualmente, en los MCI se utilizan cojinetes con una capa de trabajo de babbitt al plomo o plomo antimonio (88% Pb, 6% Sn, 6% Sb) sobre una subcapa ceramética sinterizada de polvo 40% Ni y 60% Cu con respaldo de acero. Este tipo de babbitt resiste más a la fatiga, asegura, debido a la ausencia de componentes sólidos duros, un desgaste insignificante del árbol, y permite aplicar una tecnología eficaz en la fabricación de cojinetes: el estampado en cinta.

También se utilizan en los M.C.I los babbits de estaño – plomo (como B16, BK, BK2 de las normas GOST) que por sus características son cercanos a los babbits ricos en estaño ($p \leq 150 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ y

$$p \cdot v \leq 500 \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}).$$

En resumen, los babbits al estaño y al plomo son intercambiables por la similitud de sus propiedades en un amplio rango, y sus altas propiedades antifricción estriban en su gran plasticidad que favorece

la adaptabilidad (asentado) del cojinete, en su alta termoconductividad y capacidad de retener gruesas partículas de lubricante. Por otra parte, los desechos blandos y fácilmente “embadurnables” del desgaste de los metales babbitts evitan una de las causas más peligrosas de escoriación de la superficie.

El babbitt al estaño es generalmente el material preferido, aunque es más costoso que el babbitt al plomo, el mejor de ellos, según GOST 1320-74, es el B83 (11% Sb, 6% Cu, 0.55% máx. de impurezas, 81-84% Sn) que es muy resistente a las cargas de choque y cuya temperatura de fusión es 245 °C.

A las aleaciones babbitt de estaño o plomo se adiciona antimonio (Sb) en 5 – 25%, el cual produce un elevado efecto de endurecimiento por la aparición de granos duros contenidos en la matriz. Esto proporciona resistencia al desgaste y reduce el coeficiente de fricción. La matriz suave permite ciertos desplazamientos de la carga, reduciendo el desgaste y el calor generado en la fricción.

II- Aleaciones de base cobre:

Las aleaciones de base cobre son más resistentes y duras que las aleaciones de base estaño o plomo, y tienen también mayor resistencia al desgaste. Sin embargo, tienen mayor tendencia a la rayadura y agrietamiento. Estas se clasifican en cuatro grupos:

1. Aleaciones cobre – plomo.
2. Bronces al plomo.
3. Bronces al estaño.
4. Bronces de aluminio.

De estos subgrupos nos interesan en particular los bronce al estaño y al plomo.

Los bronce al plomo son una alternativa como recubrimiento de cojinetes, con excelentes propiedades de fundición y maquinado y alta capacidad de carga. Aquí se incluyen las aleaciones desde 70/30 % (cobre/plomo), pasando por las de menor contenido de plomo, hasta el bronce fosfórico. Pueden contener estaño, junto con pequeñas proporciones de zinc. Ver anexo I, tabla 1.1.

El mecanismo antifriccional en los bronce al plomo refiere que cuando el material comienza a sobrecalentarse, el plomo funde y sale de la matriz de bronce, lo cual mejora las condiciones de fricción y ayuda a corregir la distorsión; de ser insuficiente ese alivio, el cojinete se agarrará sobre el muñón.

Los bronce al estaño son básicamente aleaciones de cobre que contienen 5 a 20 % de estaño, con pequeño contenido de fósforo, generalmente se denominan bronce fosfóricos. El bronce fosfórico aplicado en cojinetes es de alto contenido de estaño, y además puede contener plomo; tiene buena resistencia y dureza y excelente resistencia al desgaste, combinada con un coeficiente de fricción pequeño. Usualmente se utilizan en aplicaciones de baja velocidad y altas cargas.

La adición de plomo permite aumentar la resistencia a la corrosión y disminuir el contenido de estaño. Los bronce al estaño plomosos trabajan mejor que otros con piezas conjugadas no templadas. El zinc y el fósforo permiten, principalmente, mejorar las propiedades tecnológicas de los bronce.

Debido al alto costo del estaño, se limita el empleo de bronce ricos en estaño (10-20 % Sn). Sin embargo, en nuestro caso es factible su uso pues la cantidad de polvo que se emplea en la recuperación es muy pequeña y el contenido de Sn es sólo una fracción de esta; por otra parte, las pérdidas de material son mínimas. La composición y propiedades de los bronce al estaño típicos para cojinetes según normas GOST y ASTM. Ver anexo I, tabla 1.2.

A continuación se incluyen dos tablas que resumen las propiedades fundamentales de las aleaciones para cojinetes. Ver anexo I, tabla 1.3 y 1.4.

Como referencia final, puede decirse que en general los bronce son más duros que los metales babbitts, lo que empeora su conformabilidad (asentado) y hace, en cierto grado, peligrosa la presencia de productos duros del desgaste en la zona de contacto de las superficies rozantes. Los cojinetes de bronce requieren una lubricación más eficaz que los de metal babbitt. El punto fusión de los bronce (del orden de los 1000 °C) es mayor que el de los metales babbitt.

III- Metales sinterizados (porosos).

Los metales sinterizados son ampliamente usados para producir cojinetes porosos que pueden ser impregnados con lubricante y/o disulfuro de grafito o molibdeno. Los polvos metálicos más usados son de hierro, bronce al plomo y bronce en general. La porosidad está en el rango de 15 – 35 %, este volumen estará disponible para retener el lubricante. Los metales porosos también pueden ser llenados con un material termoplástico de baja fricción para el rozamiento seco.

IV- Otros materiales antifricción metálicos:

El hierro fundido está ampliamente extendido para este uso, básicamente como hierro gris. Es de pobre compatibilidad, o sea, requiere grandes clarencias u holguras y buen alineamiento del par. Exige lubricación adecuada y libre de polvo. Usualmente se emplea con árboles de acero, para cargas de presión de hasta $500 \frac{lb}{pulg^2}$ y velocidades de deslizamiento máximas de $130 \frac{pie}{min}$.

También se emplean aleaciones de base cadmio, conteniendo cobre, níquel, plata y otros elementos, que resultan buenas en árboles de acero pesadamente cargados; y aleaciones con plata que permiten las más elevadas cargas y velocidades ($4000 \frac{lb}{pulg^2}$ y $2000 \frac{pie}{min}$). Por supuesto, el elevado costo de estas aleaciones reduce su aplicación solo a diseños especiales.

Para aplicaciones particulares, puede presentar ventajas el par de árbol endurecido sobre cojinete de superficie endurecida.

1.3.3. Causas y manifestaciones de la pérdida de capacidad de trabajo de las superficies antifricción en cojinetes de deslizamiento.

- El trabajo de las fuerzas de rozamiento se consume en el calentamiento y el desgaste de las piezas. El desgaste en el conjunto de un cojinete influye en el funcionamiento de este, debido al cambio de forma de las superficies en movimiento relativo y al aumento de la holgura.
- Los cojinetes que funcionan en régimen de rozamiento líquido, se desgastan solamente durante los arranques y paradas de la máquina, cuando en la holgura cuneiforme no se crea la presión necesaria para formar la capa gruesa de lubricante que separa a las superficies de contacto, debido a la baja velocidad relativa en el régimen transiente.
- A bajas velocidades del árbol el régimen de rozamiento límite se conserva durante todo el período de funcionamiento del par, y el desgaste de la superficie tiene lugar ininterrumpidamente con una intensidad que depende de sus materiales y de los parámetros del régimen.
- A velocidades mayores que las establecidas y si hay lubricación insuficiente o grandes presiones, aumenta la temperatura y el cojinete se agarrota, lo cual es más peligroso.

- Las grietas de fatiga en la capa superficial con picadura posterior del babbitt es un tipo muy difundido de rotura de los cojinetes de carga pulsante. Las causas de las principales formas de deterioro de estas piezas se relacionan a continuación:
- El desgaste abrasivo puede ocurrir debido a: insuficiente capacidad portante de la capa lubricante en régimen de trabajo estacionario; inevitable rozamiento mixto en el arranque y la parada (si no hay lubricación hidrostática) y, sobre todo, penetración junto con el lubricante de partículas abrasivas de dimensiones conmensurables con el espesor de la capa lubricante.
- El agarrotamiento generalmente tiene lugar debido a que la película de lubricante pierde su capacidad protectora por la acción de elevadas presiones y temperaturas locales. En los cojinetes suelen formarse "zonas calientes" localizadas que provocan el agarrotamiento, el cual se manifiesta más frecuentemente si los gorriones no están templados y si los materiales de los cojinetes son duros.
- Al agarrotamiento contribuyen fuertemente: la no observación de la holgura adecuada durante el montaje del par; elevadas presiones de arista, debido a discrepancias de axialidad iniciales; desperfectos de las superficies rozantes (rebabas, rayaduras, bordes agudos de los orificios de lubricación, etc.) y deformaciones térmicas de los árboles. La etapa final del fallo del cojinete, si no se consigue parar a tiempo el árbol, es el agarrotamiento completo del gorrón en el cojinete, como resultado del calentamiento del gorrón y de la desaparición completa de la holgura.
- La rotura por fatiga de la capa friccional se debe a la notable pulsación de la carga en las máquinas de pistón.
- Las deformaciones térmicas se manifiestan en caso de pequeñas holguras, relacionadas con las altas exigencias de precisión de giro de los árboles.
- La exfoliación es la pérdida progresiva de la capa antifricción por mala calidad del material y/o proceso de revestimiento.

Estas fallas han sido observadas en un amplio grupo de cojinetes, los cuales son objeto de nuestro trabajo.

Capítulo II. Método de Prensado en Caliente Bajo Fuerzas Dilatométricas.

2.1. Esencia física del método. Expresiones de Cálculo para cojinetes cilíndricos y planos.

Utilizando los conceptos básicos de Dilatometría, teniendo en cuenta que existen aceros con diferentes coeficientes de dilatación lineal, surge la idea, que constituye la esencia física del método, de compactar el polvo de bronce sobre un substrato metálico, colocado entre dos moldes cilíndricos de acero, el interior con coeficiente de dilatación lineal α_1 y el exterior con coeficiente de dilatación lineal α_2 ($\alpha_1 > \alpha_2$), que al ser calentados a la temperatura de sinterización del bronce (780 °C) permitirían el prensado en caliente bajo fuerzas dilatométricas. A este método se le ha denominado “Pulvimetalurgia Dilatométrica”.

2.1.1. Cojinetes cilíndricos.

En la figura 2.1 se muestra esquemáticamente, como ocurre la reducción de la cavidad cilíndrica y concéntrica confinada entre dos cilindros de acero, con radio r_1 y coeficiente de dilatación lineal α_1 y un cilindro exterior con radio interior r_2 y coeficiente de dilatación lineal α_2 , donde $\alpha_1 > \alpha_2$.

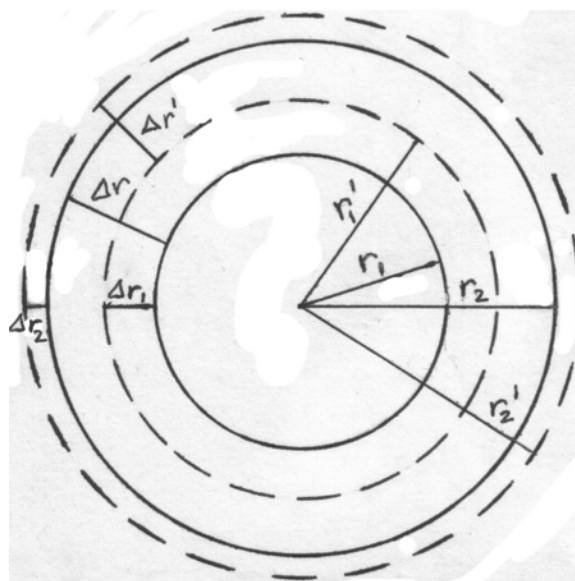


Figura 2.1: Esquema de la reducción cilíndrica por dilatación lineal.

Donde:

r_1 : Radio exterior del casquillo interior.

r_2 : Radio interior del casquillo exterior.

Capítulo II. Método de Prensado en Caliente Bajo Fuerzas Dilatómicas.

r_1' : Radio exterior del casquillo interior a elevada temperatura.

r_2' : Radio interior del casquillo exterior a elevada temperatura.

Δr_1 y Δr_2 : Es el aumento de r_1 y r_2 por dilatación lineal.

$\Delta r'$: Reducción del radio por dilatación lineal.

α : Coeficiente de dilatación lineal

En la figura 2.2 se muestra el esquema del molde radial para el prensado en caliente por Pulvimetalurgia Dilatómica, lográndose a partir del mismo las ecuaciones necesarias para dimensionar el molde.

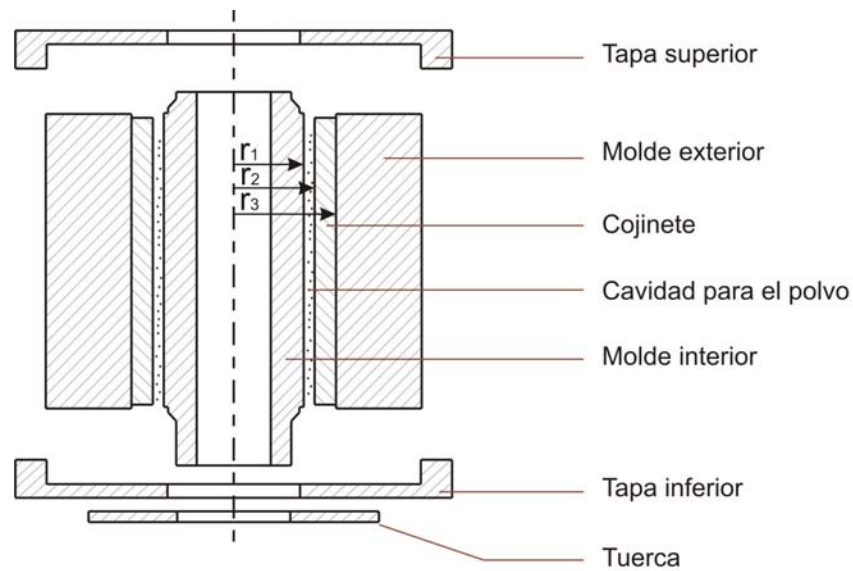


Figura 2.2 Esquema del molde radial

Obtención de las expresiones básicas.

El coeficiente de compactación (K), es una magnitud que relaciona la densidad final del polvo con la inicial, es un término que caracteriza la porosidad y las propiedades mecánicas del producto final, el mismo está definido, por la ecuación:

$$K = \frac{\rho_s}{\rho_i} \quad (2.1)$$

donde (ρ_s): densidad del comprimido

$$\rho_s = \frac{m_f}{V_f} \quad (2.2)$$

Capítulo II. Método de Prensado en Caliente Bajo Fuerzas Dilatométricas.

ρ_i : densidad inicial

$$\rho_i = \frac{m_i}{V_i} \quad (2.3)$$

Como las masas son iguales ($m_i = m_f$)

Sustituyendo 2.2 y 2.3 en 2.1 tenemos:

$$K = \frac{V_i}{V_f} \quad (2.4)$$

Donde:

V_i : Volumen Inicial

$$V_i = \pi (r_2^2 - r_1^2) \cdot h \quad (2.5)$$

V_f : Volumen del polvo comprimido

$$V_f = \pi (r_2'^2 - r_1'^2) \cdot h \quad (2.6)$$

donde:

h = altura del molde exterior

Sustituyendo 2.5 y 2.6 en 2.4 obtenemos:

$$K = \frac{\pi(r_2^2 - r_1^2) \cdot h}{\pi(r_2'^2 - r_1'^2) \cdot h} \quad (2.7)$$

$$r_1'^2 = (r_1 + \Delta r_1)^2 \quad (2.8)$$

$$r_2'^2 = (r_2 + \Delta r_2)^2 \quad (2.9)$$

$$\Delta r_1 = r_1 \cdot \alpha_1 \cdot \Delta T \quad (2.10)$$

$$\Delta r_2 = r_2 \cdot \alpha_2 \cdot \Delta T \quad (2.11)$$

donde:

α_1 y α_2 : Coeficientes de dilatación lineal del monte interior y del molde exterior.

Sustituyendo 2.10 en 2.8 y 2.11 en 2.9 se obtiene entonces:

$$r_1'^2 = r_1^2 (1 + \alpha_1 \Delta T)^2 \quad (2.12)$$

$$r_2'^2 = r_2^2 (1 + \alpha_2 \Delta T)^2 \quad (2.13)$$

Sustituyendo 2.12 y 2.13 en 2.7 se obtiene:

$$K = \frac{(r_2^2 - r_1^2)}{r_2^2(1 + \alpha_2 \Delta T)^2 - r_1^2(1 + \alpha_1 \Delta T)^2} \quad (2.14)$$

despejando r_1 en la ecuación 2.14 se obtiene:

$$r_1 = \sqrt{\frac{r_2^2 - K r_2^2 (1 + \alpha_2 \Delta T)^2}{1 - K(1 + \alpha_1 \Delta T)^2}} \quad (2.15)$$

Teniendo en cuenta que Xp se recomienda entre 10 y 35 % de porosidad y que en un material sinterizado poroso el % de poros esta dado por:

$$Xp = \left[1 - \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} \right) \right] \cdot 100 \% \quad (2.16)$$

Despejando ρ_s en 2.16 y sustituyendo en 2.1 se obtiene:

$$K = (1 - Xp) \frac{\rho_f}{\rho_i} \quad (2.17)$$

2.1.2. Cojinetes planos.

Para el prensado del polvo de bronce sobre una superficie plana en caliente, partimos de las mismas leyes de la física que en los casos de superficies cilíndricas, con la particularidad que es en este caso interesa el cambio de longitud. Las distancias Inter-atómicas y por tanto las dimensiones de los sólidos cristalinos son función de la temperatura. La variación de la longitud sigue la siguiente Ley:

En general en los metales se cumple que: $\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T$

En la figura 2.3 se muestra el esquema con el principio de operación del dispositivo para recuperar cojinetes planos por prensado en caliente bajo fuerzas dilatométricas, con el objetivo de facilitar la comprensión del algoritmo de cálculo, el que permite obtener sus dimensiones fundamentales.

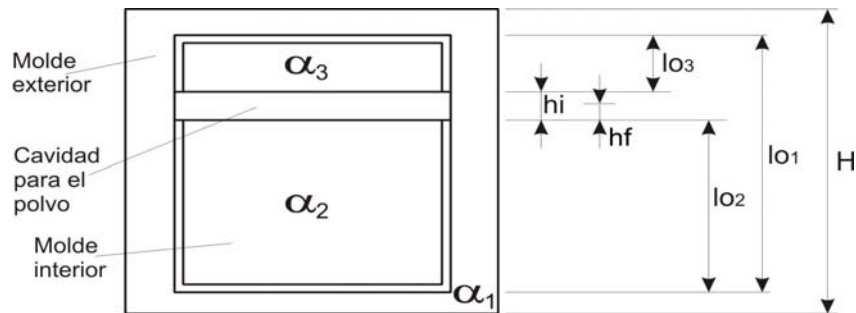


Figura 2.3 Esquema de la reducción de longitud por dilatación lineal.

Capítulo II. Método de Prensado en Caliente Bajo Fuerzas Dilatómicas.

l_{o1} : longitud inicial del molde exterior, con coeficiente de dilatación lineal α_1

l_{o2} : longitud inicial del molde interior, con coeficiente de dilatación lineal α_2

l_{o3} : Longitud inicial del lateral a recuperar con coeficiente de dilatación lineal α_3

α : Coeficiente de dilatación lineal, donde $\alpha_2 > \alpha_1$

La reducción de la cavidad estará dada al cambiar la temperatura por:

$$\Delta l = \Delta l_2 + \Delta l_3 - \Delta l_1 \quad (2.18)$$

$$h_i = h_f + \Delta l \quad (2.19)$$

De la física se tiene que:

$$\Delta l_1 = l_{o1} \cdot \alpha_1 \cdot \Delta T \quad (2.20)$$

$$\Delta l_2 = l_{o2} \cdot \alpha_2 \cdot \Delta T \quad (2.21)$$

$$\Delta l_3 = l_{o3} \cdot \alpha_3 \cdot \Delta T \quad (2.22)$$

Sustituyendo 2.20, 2.21 y 2.22 en 2.18 se obtiene:

$$\Delta l = l_{o2} \cdot \alpha_2 \cdot \Delta T + l_{o3} \cdot \alpha_3 \cdot \Delta T - l_{o1} \cdot \alpha_1 \cdot \Delta T \quad (2.23)$$

$$\Delta l = (l_{o2} \cdot \alpha_2 + l_{o3} \cdot \alpha_3 - l_{o1} \cdot \alpha_1) \cdot \Delta T$$

Del esquema se obtiene:

$$l_{o1} = l_{o2} + l_{o3} + h_i \quad (2.24)$$

Sustituyendo 2.24 en 2.23 se obtiene:

$$\Delta l = [l_{o2}(\alpha_2 - \alpha_1) + l_{o3}(\alpha_3 - \alpha_1) - h_i \cdot \alpha_1] \cdot \Delta T \quad (2.25)$$

$$l_f = l_i(1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

En la ecuación 2.1 aplicándolo al esquema se obtiene:

$$K = 1 + \frac{\Delta l}{h_f} \quad (2.26)$$

Sustituyendo 2.17 en 2.26 y despejando se obtiene:

$$\Delta l = \left[(1 - X_p) \cdot \frac{\rho_f}{\rho_i} - 1 \right] \cdot h_f \quad (2.27)$$

Capítulo II. Método de Prensado en Caliente Bajo Fuerzas Dilatométricas.

Despejando l_{O_2} en la ecuación 2.25 se obtiene:

$$l_{O_2} = \left[\frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1} \right] \cdot \left[\frac{\Delta l}{\Delta T} - l_{O_3} \cdot (\alpha_3 - \alpha_1) + h_1 \cdot \alpha_1 \right] \quad (2.28)$$

De la figura 2.3 también se deduce:

$$H = l_{O_2} + l_{O_3} + h_i + 2S$$

2.2. Selección de los materiales.

Después de obtener las ecuaciones fundamentales se puede diseñar los moldes: para ello se comienza seleccionando los materiales a utilizar en los mismos.

Para la selección de los aceros empleados en la construcción del molde, se hizo una revisión bibliográfica acerca de las propiedades de los aceros con más alto y más bajo coeficiente de dilatación lineal, teniendo en cuenta además otros aspectos importantes por las particularidades de la tecnología usada:

- Ninguno de los dos aceros presenta transformaciones de fase y manifiestan estabilidad de las propiedades mecánicas en el intervalo de temperaturas de trabajo.
- Comportamiento del acero ante la elaboración por arranque de virutas.
- Disponibilidad o existencia y costo de los mismos.

Teniendo en cuenta todos estos factores, se decide utilizar los aceros X18H10T y 2X13, de alto y bajo coeficiente de dilatación lineal, respectivamente. Ver anexo II, tabla 2.1.

Los aceros seleccionados presentan una diferencia en el coeficiente de dilatación lineal de $6 \cdot 10^{-6} K^{-1}$.

Ambos poseen más del 12 % de cromo, son aceros inoxidable. Ver anexo II, tabla 2.2.

2.3. Obtención de los moldes.

Para la comprensión se muestra el cálculo de las dimensiones del dispositivo para la recuperación de cojinetes planos.

A continuación se ofrecen los pasos a seguir para dimensionar el dispositivo dilatométrico y los resultados obtenidos al evaluarlas:

Capítulo II. Método de Prensado en Caliente Bajo Fuerzas Dilatométricas.

1- Datos de entrada:

Coefficientes de dilatación lineal α_1 , α_2 , α_3 ; ΔT y los parámetros ρ_f (densidad de la aleación fundida para el bronce utilizado: $\frac{g}{cm^3}$) y ρ_i (densidad inicial del polvo: $\frac{g}{cm^3}$).

Datos:

$$\alpha_1 = 13 \cdot 10^{-6} k^{-1}$$

$$\alpha_2 = 19 \cdot 10^{-6} k^{-1}$$

$$\alpha_3 = 16 \cdot 10^{-6} k^{-1}$$

$$\Delta T = 740^\circ C$$

$$\rho_f = 8.8 \frac{g}{cm^3}$$

$$\rho_i = 3.4 \frac{g}{cm^3}$$

2- Medir el espesor del cojinete a recuperar (l_{o_3})

$$l_{o_3} = 12 \text{ mm}$$

3- Proponer el espesor de la capa a depositar (hf), tomando en cuenta el sobre-espesor para el maquinado final del lateral

$$hf = 0.3 \text{ mm}$$

4- Proponer el % de porosidad deseado del material Xp (definido como $Xp = \left(1 - \left[\frac{\rho_s}{\rho_f}\right]\right) \cdot 100\%$,

donde ρ_s es la densidad final de aleación sinterizada), teniendo en cuenta que en la literatura sobre materiales antifricción se recomienda entre 10 y 35 % de porosidad.

$$Xp = 25\%$$

5- Calcular el coeficiente de compactación (K), coeficiente definido como $K = \frac{\rho_s}{\rho_i}$, por la ecuación

2.17.

$$K = (1 - Xp) \frac{\rho_f}{\rho_i}$$

$$K = 1.93$$

Capítulo II. Método de Prensado en Caliente Bajo Fuerzas Dilatométricas.

6- Calcular la reducción de la cavidad para el polvo (Δl) según la ecuación 2.27:

$$\Delta l = \left[(1 - X_p) \cdot \frac{\rho_f}{\rho_i} - 1 \right] \cdot h_f$$

$$\Delta l = 0.29 \text{ mm}$$

7- Calcular el espesor inicial de la cavidad para el polvo (h_i) según la ecuación:

$$h_i = h_f + \Delta l$$

$$h_i = 0.6 \text{ mm}$$

8- Calcular la longitud sumaria de los discos superior e inferior (l_{o2}), según la ecuación:

$$l_{o2} = \left[\frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1} \right] \cdot \left[\frac{\Delta l}{\Delta T} - l_{o3} \cdot (\alpha_3 - \alpha_1) + h_i \cdot \alpha_1 \right]$$

$$l_{o2} = 59.74 \text{ mm}$$

9- Calcular la altura total del eje (H), según la ecuación:

$$H = l_{o2} + l_{o3} + h_i + 2S$$

$$H = 130 \text{ mm}$$

10- Diámetro del dispositivo en el plano del cojinete. Estas dimensiones dependen de la geometría del propio cojinete y del diseño.

$$D = 120 \text{ mm}$$

Con estas dimensiones se procedió a la construcción del dispositivo. Ver figura 2.4.



Figura 2.4 Molde para la recuperación de cojinetes planos.

2.4. Intercambiabilidad y productividad de los dispositivos.

Dado que existen varias reparaciones normalizadas para los cigüeñales, es necesario a partir de un mismo molde recuperar cojinetes para las diferentes reparaciones, esto se logra fabricando diferentes moldes interiores en función de la reparación requerida. Para este fin se desarrolló un Software sencillo que permitiera el cálculo rápido y diera la posibilidad de analizar resultados, previo a la construcción del molde, ver figura 2.5.



Figura 2.5. Molde para la recuperación de cojinetes cilíndricos de diferentes medidas estandarizados.

Como se observa en la figura 2.5 se aprovecha la propiedad de intercambiabilidad de los moldes, por lo que solo hubo que construir el molde interior del dispositivo y utilizar las tapas y el molde exterior como piezas intercambiables.

Con esta solución se resuelve un gran problema, ofertar cojinetes de todas las reparaciones en déficit, pero aun quedaba por resolver la recuperación de los bujes del árbol de levas, a lo cual se le dio solución, pero fue un poco más lejos a la hora de diseñar el dispositivo, ya que se necesitaba

Capítulo II. Método de Prensado en Caliente Bajo Fuerzas Dilatométricas.

lograr mayor productividad de los mismos, es decir aprovechar la instalación con que se contaba más eficientemente, lograr mejor utilización del horno Mufla, ahorrar energía y tiempo, logrando recuperar o fabricar varias piezas a la vez, ver figura 2.6.



Figura 2.6. Molde de alta productividad para la fabricación de bujes del árbol de levas del tractor Komatsu.

Como se muestra en la figura 2.6 este molde de mayor productividad para los bujes del árbol de levas del tractor Komatsu es la primera solución a la problemática de productividad, con el cual se demostró su factibilidad técnica, quedando la posibilidad de aplicarlo para otros bujes y piezas a recuperar.

Capítulo II. Método de Prensado en Caliente Bajo Fuerzas Dilatométricas.

2.5. Horno con Atmósfera Neutra.

La oxidación del material es un proceso indeseable que aparece durante la sinterización del polvo metálico en atmósfera no controlada (oxidante). A partir de trabajos anteriores se conocen los siguientes efectos asociados a ella:

1. Aparición de óxidos de cobre en la superficie del cojinete, de color verde-azul oscuro.
2. Mala adherencia del material en la zona del cojinete cercana a la parte superior del molde, donde es particularmente intensa la oxidación. Los bordes eran generalmente defectuosos.
3. Problemas frecuentes de mala adherencia del metal depositado, que obligan a desechar el cojinete. Esto, además atentaba contra la productividad del proceso.

Estos factores determinaron la necesidad de búsqueda e implementación de atmósfera controlada para la fabricación y/o recuperación de piezas por “Pulvimetalurgia Dilatométrica”.

La atmósfera utilizada en un proceso va íntimamente ligada al servicio o prestación que se quiera obtener de la misma, es decir, el resultado de la aplicación tiene que ser de una calidad que compense el costo asumido en su producción.

Atmósferas. Clasificación.

- **Atmósfera neutra (o protectora)**, para proteger al proceso de la oxidación. Ésta como su nombre indica sólo protege de la entrada de oxígeno en la atmósfera de trabajo; con lo cual no reacciona ante las pequeñas partículas de dicho gas que ya pudiesen encontrarse dentro. El Argón es el gas más neutro, y conlleva un alto costo. Otra posibilidad para algunos procesos es el Nitrógeno, pero hay serios riesgos de oxidación.
- **Atmósfera débilmente activa**, con Argón o Nitrógeno y mezcla al 10% de Hidrógeno. Con ello se consigue no sólo proteger la entrada de Oxígeno sino también eliminar posibles partículas existentes en la atmósfera. Dichas mezclas son muy usadas. El único inconveniente es el alto costo que suponen las bombonas.
- **Atmósfera activa/reductora**, con Nitrógeno e Hidrógeno al 75% (amoníaco sintético). Ésta es una atmósfera que evita la oxidación. Sus inconvenientes son alto costo de las bombonas, el riesgo de manipulación y almacenamiento, así como el residuo generado.
- **Atmósfera activa/fuertemente reductora**. Hidrógeno puro. El hidrógeno ofrece la mejor atmósfera contra la oxidación, la más alta y precisa conductibilidad térmica (1.710 PW/cm/°C) y mejor calidad de acabado en superficie de las piezas a tratar.

Capítulo II. Método de Prensado en Caliente Bajo Fuerzas Dilatométricas.

Esta última sería la atmósfera ideal a utilizar prácticamente en todo tratamiento térmico sino fuera por el altísimo costo que ésta supone, aún sabiendo que el hidrógeno con sus características ofrece mayor velocidad, calidad de proceso, aumento de la producción, ahorro de energía eléctrica y la no-aplicación de procesos de limpiado posteriores.

En este trabajo el objetivo es crear una atmósfera libre de oxígeno para el sinterizado de los polvos, con la construcción de una instalación que se le anexa a un Horno Mufla.

Partes componentes de la instalación experimental.

Para evitar o reducir la oxidación durante la sinterización se empleará atmósfera controlada de nitrógeno en la cámara de un horno mufla, y polvo metálico desoxidado. Las partes fundamentales de la instalación se relacionan a continuación. Ver figura 2.7.



Figura 2.7. Instalación del Horno Mufla con atmósfera neutra:

1. Botella de nitrógeno.
2. Manoreductor o regulador de presión.
3. Instrumento Medidor de flujo.
4. Cámara hermética inoxidable para la atmósfera controlada.
5. Mangueras de goma y tubos de cobre u otro material.

Capítulo II. Método de Prensado en Caliente Bajo Fuerzas Dilatométricas.

Montaje de la Instalación para controlar la atmósfera del horno. Secuencia y normas de explotación.

Cuando se tienen todos los elementos componentes, puede procederse al montaje. Para ello deben garantizarse todas las herramientas e instrumentos necesarios.

La secuencia de montaje de la instalación consta de las siguientes etapas:

1. Introducir la caja para el control de atmósfera en la cámara del horno estando este desconectado y a temperatura ambiente.
2. Introducir en la caja el tubo conductor de nitrógeno.
3. Roscar el regulador de presión a la botella de nitrógeno, que debe situarse convenientemente cerca del horno, y dar el apriete que garantice el sellaje de la unión.
4. Conectar el conducto de salida del regulador de presión con la toma de entrada del flujómetro y este con el tubo de cobre que conduce al nitrógeno hacia la cámara del horno.
5. Colocar presillas u otro elemento de fijación que garantice que no se desconecten las mangueras, tubos, etc.
6. Sellar todas las uniones con amianto para reducir los escapes de nitrógeno.

Secuencia tecnológica para la explotación de la instalación con atmósfera controlada

1. Encender el horno y llevarlo a la temperatura de trabajo a la que se realizará el experimento.
2. Preparar el dispositivo dilatométrico con los cojinetes que se van a experimentar.
3. Verificar que la válvula de regulación del manoreductor esté cerrada totalmente.
4. Abrir la válvula de paso del gas desde la botella pasando el gas al manoreductor.
5. Leer la presión del gas que existe hasta el flujómetro.
6. Abrir lentamente la válvula de regulación del manoreductor hasta lograr un caudal recomendado para la operación de (3pies³/h).
7. Introducir el dispositivo dilatométrico en la cámara del horno.
8. Proceder según la tecnología a la recuperación del cojinete en cuestión.
9. Al terminar, cortar el flujo de nitrógeno y extraer el dispositivo del horno.

Resultados de la fabricación y/o recuperación de piezas por “Pulvimetalurgia Dilatométrica” bajo atmósfera controlada neutra.

Del análisis de las piezas se obtienen los siguientes resultados:

1. Reducción al mínimo de la oxidación del material depositado, presenta un color amarillo oscuro propio del bronce al estaño utilizado.

Capítulo II. Método de Prensado en Caliente Bajo Fuerzas Dilatométricas.

2. La adherencia del metal es satisfactoria.
3. Todas las piezas resultaron satisfactorias contribuyendo al incremento de la productividad del proceso.
4. La contribución de la atmósfera controlada al desarrollo de una mejor sinterización y estado superficial del material.

Los resultados del ensayo bajo atmósfera controlada representan un avance importante en la solución de los problemas detectados en trabajos precedentes.

2.6. Tecnología de recuperación y fabricación de cojinetes por “Pulvimetalurgia Dilatométrica”.

- 1- Limpieza de los cojinetes usados hasta dejar la base de bronce limpia de Babbitt y óxidos.
- 2- Motar los cojinetes en el molde exterior utilizando una prensa de mano, debe garantizarse que las muescas del cojinete ocupen la cavidad realizada en el molde exterior. Los cojinetes deben llegar hasta el mismo nivel de base del cilindro dejando 2 mm de cavidad superior para el sobrellenado. Verifíquese usando el parámetro.
- 3- Colocación del molde interior sobre la tapa base inferior y ajuste con la tuerca.
- 4- Colocación del molde exterior con los cojinetes a recuperar en el molde interior garantizando la concentricidad y uniformidad en la cavidad para el llenado del polvo. Los ajustes deben alcanzarse con una prensa manual.
- 5- Verificación de la uniformidad de la cavidad para el polvo.
- 6- Llenado de la cavidad con el polvo.
- 7- Colocación de la tapa superior utilizando una prensa manual o mecánica.
- 8- Colocación del conjunto en el horno con atmósfera controlada, preferiblemente reductora a la temperatura de sinterización durante 75 min.
- 9- Enfriado del conjunto al aire hasta aproximadamente 200 °C, luego puede continuarse con enfriamiento en agua.
- 10- Destape el conjunto utilizando un extractor manual.
- 11- Extracción de los cojinetes recuperados del molde exterior, utilizando la prensa y los dispositivos auxiliares.
- 12- Revisión visual del cojinete y separación de los semicasquillos manualmente o con golpes ligeros en la unión.

2.7. Ventajas del prensado en caliente por “Pulvimetalurgia Dilatométrica”.

- 1- La distribución de los esfuerzos de conformado ocurre uniformemente por toda la superficie del metal, lográndose una densidad homogénea del comprimido, lo que no ocurre en el método tradicional.
- 2- No existe fricción exterior, pues no se desliza el molde respecto al polvo y se reduce la fricción interna por el efecto de las altas temperaturas.
- 3- Se evitan las operaciones propias del conformado en frío.
- 4- No se requieren de elevadas propiedades mecánicas del molde, ni resistencia al desgaste, porque la resistencia del polvo al ser comprimido en caliente es baja.
- 5- Se pueden ajustar las medidas del molde para obtener las dimensiones y el acabado requerido en el metal depositado, siendo despreciables los efectos de remanencia elástica, debiéndose considerar los efectos de contracción dilatométrica del producto final.
- 6- Se pueden obtener capas de bronce antifricción en los cojinetes de diferentes composiciones químicas y propiedades mecánicas, lo que no se puede lograr por fundición.
- 7- En la compresión, conformado a altas temperaturas los procesos difusivos propios del sinterizado se aceleran, lo que permite llegar a un compromiso para disminuir la temperatura y el tiempo necesario para el proceso.
- 8- Los efectos de oxidación se reducen, pues el polvo se sinteriza en una cavidad cerrada. Se requiere de un estudio más profundo del grado de oxidación y su influencia en las propiedades del producto final.
- 9- No se requiere de ningún material que evite la adhesión al molde interior, solo es necesario un buen acabado.
- 10- Se pueden obtener capas de diferentes dimensiones en el cilindro interior, lo cual puede hacerse disponiendo de un juego de cilindros desmontables en función de las distintas medidas del cigüeñal o árbol.
- 11- Ha sido demostrada experimentalmente la estabilidad en las dimensiones de los moldes, luego de efectuarse más de 25 operaciones de prensado en caliente.
- 12- No se requiere de operaciones de maquinado antes del prensado en caliente.

Como se puede apreciar la aplicación de este método brinda una serie de ventajas con respecto al método de comprimido y sinterizado independiente, que además no puede ser aplicado para cojinetes.

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

3.1. Optimización del Proceso.

3.1.1 Metodología de Superficies de Respuesta.

La Metodología de Superficies de Respuesta (RSM) es un conjunto de técnicas matemáticas utilizadas en el tratamiento de problemas en los que una respuesta de interés está influida por varios factores de carácter cuantitativo. El propósito inicial de estas técnicas es diseñar un experimento que proporcione valores razonables de la variable respuesta y, a continuación, determinar el modelo matemático que mejor se ajusta a los datos obtenidos. El objetivo final es establecer los valores de los factores que optimizan el valor de la variable respuesta.

Función de respuesta.

Cuando decimos que el valor real esperado, η que toma la variable de interés considerada está influido por los niveles de k factores cuantitativos, $X_1, X_2, \dots, X_k$, esto significa que existe alguna función de $X_1, X_2, \dots, X_k$ (que se supone continua en $X_i, \forall i = 1, \dots, k$) que proporciona el correspondiente valor de η para alguna combinación dada de niveles:

$$\eta = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$$

de tal forma que la variable respuesta puede expresarse como:

$$Y = \eta + \varepsilon = f(X_1, X_2, \dots, X_k) + \varepsilon$$

donde ε es el error observado en la respuesta.

La relación $\eta = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$ existente entre η y los niveles de los k factores puede representarse a través de una hipersuperficie (subconjunto de un espacio euclídeo $(k+1)$ -dimensional) a la que llamaremos superficie de respuesta.

A la hora de planificar el programa de experimentación que nos va a permitir llevar a cabo el estudio acerca del efecto de los factores sobre la variable respuesta, el primer paso que debemos dar es la elección de los factores que usaremos en el experimento. Una vez determinados, el siguiente paso es seleccionar los rangos de valores de cada factor que se considerarán, pues aunque en el experimento es posible explorar la región correspondiente al espacio completo de los factores de influencia o región operativa, lo más frecuente consiste en

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

explorar únicamente una región de interés limitada, la región experimental, contenida en la región general. De este modo, durante la ejecución del experimento, sólo se utilizarán niveles de los factores correspondientes a valores que caigan en esta región, a menos que se descubra, durante el conjunto inicial de experimentos, que pueda ser necesario explorar niveles que estén más allá de los límites de la región considerada.

Superficies de respuesta polinómicas.

La forma de la función f que determina la relación entre los factores y la variable respuesta es, en general, desconocida, por lo que el primer objetivo de la RSM consiste en establecer experimentalmente una aproximación apropiada de la función f . Para ello, se propone un modelo de ecuación, generalmente polinómico, en los k factores $X_1, X_2, \dots, X_k$ y se selecciona un conjunto de tratamientos sobre los que se realizan las observaciones experimentales, que se utilizarán tanto para obtener estimaciones de los coeficientes en el modelo propuesto (por ejemplo, a través del método de mínimos cuadrados) como para obtener una estimación de la variación del error experimental (para lo que es necesario tener al menos 2 observaciones por cada tratamiento). Se realizan, entonces, contrastes sobre las estimaciones de los parámetros y sobre el ajuste del modelo y si el modelo se considera adecuado, puede utilizarse como función de aproximación. En tal caso, el estudio de la superficie de respuesta se hace en términos de la superficie ajustada, pues su análisis será aproximadamente equivalente al del sistema real.

Los polinomios usados más frecuentemente como funciones de aproximación son los de órdenes uno y dos, que nos proporcionan, respectivamente los siguientes modelos:

Superficies de Respuesta Polinómicas. Modelos de Primer y Segundo Orden

$$\blacksquare \text{ modelo de primer orden } \equiv Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \varepsilon$$

$$\blacksquare \text{ modelo de segundo orden } \equiv Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{\substack{i,j \\ i < j}} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$$

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

Variables codificadas

En la construcción de modelos de superficies de respuesta, es muy común la codificación de los valores reales de los niveles de los factores, pues las distancias medidas sobre los ejes de las variables codificadas en el espacio k-dimensional se convierten en estándar, lo que facilita considerablemente los cálculos que deben llevarse a cabo para obtener el modelo de aproximación e incrementa el ajuste en la estimación de los coeficientes.

Una fórmula que suele resultar útil para codificar los valores de los factores es la siguiente:

$$x_i = \frac{X_i - \left(\frac{X_{iNInf} + X_{iNSup}}{2} \right)}{X_{iNSup} - X_{iNInf}} = \frac{X_i - (\tilde{X}_i)}{X_{iNSup} - X_{iNInf}} \quad i = 1, 2, \dots, k$$

donde $X_{iNInf} \equiv$ valor del nivel más bajo del factor i y $X_{iNSup} \equiv$ valor del nivel más alto del factor i y

$\tilde{X}_i = \frac{X_{iNInf} + X_{iNSup}}{2}$, es la media entre los valores más alto y más bajo del nivel $i = 1, \dots, n$. La

fórmula anterior verifica que $\sum_{i=1}^k x_i = 0$ y transforma las medias $\tilde{X}_1, \dots, \tilde{X}_k$ en el punto

$(x_1, \dots, x_k) = (0, \dots, 0)$ al que se denomina *centro del diseño*.

Por tanto, a partir de ahora se trabajará con las variables codificadas, pues las conclusiones que se obtengan sobre éstas pueden extrapolarse a las variables reales.

Naturaleza secuencial de las RSM

La RSM es una técnica secuencial. A menudo, la estimación inicial de las condiciones óptimas de operación está alejada del óptimo real, así que el objetivo es, usando un método lo más simple y menos costoso posible, moverse rápidamente hacia las cercanías del óptimo.

En general, se sabe muy poco o nada acerca de la relación existente entre la variable respuesta y los factores, así que, en un principio, se propone el modelo de aproximación más simple posible, el de primer orden, que suministra la base para ejecutar un conjunto inicial de experimentos que proporcionarán datos correspondientes a los puntos del diseño de primer orden. Si los datos recogidos permiten hacer una estimación de la varianza del error, se puede llevar a cabo un contraste para evaluar el ajuste del modelo. Esto nos lleva a una segunda etapa, que consiste en localizar áreas de la región experimental en las que se sospeche que puedan estar los valores más deseables de la variable respuesta. El plan que vamos a seguir,

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

que nos llevará hacia valores máximos en la respuesta, se conoce como **método de máxima pendiente en ascenso** (en descenso si lo que queremos es minimizar los valores de la respuesta), que consiste en ejecutar una secuencia de experimentos a lo largo de la línea de máximo incremento de la respuesta. Si el modelo ajustado de primer orden es adecuado, la información que éste proporciona se utiliza para determinar una dirección en la cual se espere observar mayores valores de la variable respuesta. Este proceso continúa hasta que se hace evidente que a partir del método no se puede obtener un incremento en la respuesta o éste es muy pequeño.

Si las pruebas de ajuste detectan que puede haber curvatura en la superficie, se aumenta un grado al modelo añadiéndole los términos del producto cruzado y/o los términos cuadráticos puros y se completa el diseño de primer orden añadiéndole los puntos necesarios para ajustar el nuevo modelo de segundo orden. Si el modelo de segundo orden se ajusta adecuadamente, se utiliza para describir la forma de la superficie a través de la gráfica de contornos en la región experimental. Se utiliza entonces el modelo ajustado de segundo orden para localizar, en el lugar en el que la pendiente de la superficie ajustada es cero, las coordenadas del **punto estacionario**, que es el punto que proporciona el valor óptimo de la variable respuesta y, si se detecta que éste se encuentra dentro de los límites de la región experimental, se pasa a determinar su naturaleza (si es máximo, mínimo o punto de silla). Si, por el contrario, el punto estacionario no se halla dentro de la región experimental, hemos de realizar una nueva experimentación en la dirección en la que éste se encuentra. Una vez que se ha localizado el punto que proporciona valores óptimos de la variable respuesta, se describe la superficie en un entorno próximo a éste.

Diseños de superficies de respuesta.

La elección de un diseño adecuado del experimento a realizar es fundamental para modelar y explorar la superficie de respuesta usada para ajustar un modelo polinómico al conjunto de datos recogidos en los puntos del diseño.

Un **diseño ortogonal** es aquel en el que los términos del modelo ajustado son incorrelados y, por tanto, también las estimaciones de los parámetros lo son, en cuyo caso, la varianza de la respuesta esperada en cualquier punto de la región experimental se puede expresar como la suma ponderada de las varianzas de los parámetros estimados del modelo.

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

Por otro lado, en un **diseño invariante por rotación**, la varianza de $\hat{Y}(x)$, que depende de la situación del punto x , es función únicamente de la distancia del punto al centro del diseño, lo que significa que es la misma en todos los puntos equidistantes del centro del diseño. Teniendo en cuenta que el objetivo de la RSM es la optimización de la respuesta y que se desconoce la localización del óptimo antes de ejecutar el experimento, esta propiedad resulta muy interesante, puesto que garantiza que el diseño proporciona estimaciones igualmente precisas en todas las direcciones.

Si el modelo de primer orden es una representación adecuada de la respuesta real esperada, entonces el diseño elegido para estimar los parámetros debe proporcionar valores razonables de la respuesta sobre la región de interés. Los diseños considerados con el propósito de recoger datos para ajustar un modelo de primer orden se conocen como **diseños de primer orden**. Por tanto, consideraremos únicamente aquellos diseños de primer orden que son ortogonales y, en particular, los diseños factoriales 2^k . En un diseño factorial 2^k , para cada factor se consideran dos niveles, que pueden codificarse en los valores $+1$ (para el más alto) y -1 (para el más bajo). Considerando todas las posibles combinaciones de los niveles de los k factores, se obtiene una matriz de diseño de 2^k filas, cada una de las cuales representa un tratamiento.

Los diseños utilizados para recoger observaciones que permitan estimar los parámetros de los modelos de segundo orden se denominan **diseños de segundo orden**. Éstos deben tener, al menos, $(k+1)(k+2)/2$ puntos, que es precisamente el número de coeficientes del modelo que se necesita estimar y deben involucrar, como mínimo 3 factores, dado que el modelo contiene términos cuadráticos puros. Por otro lado, sería conveniente, por las razones que se han comentado, que fueran ortogonales y/o invariantes por rotación. Así pues, se van a considerar los diseños factoriales 3^k , que son ortogonales, pero no invariantes por rotación, y los diseños compuestos centrales, que verifican ambas propiedades.

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

Los diseños compuestos centrales se presentan como una alternativa a los diseños factoriales 2^k .

Un diseño compuesto central consiste en:

1. Parte factorial: un diseño factorial 2^k , completo o fraccional, en el que los niveles están codificados en la forma habitual como ± 1 .
2. n_0 (≥ 1) puntos centrales.
3. Parte axial: dos puntos axiales en los ejes correspondientes a cada uno de los factores, situados a una distancia α del centro del diseño.

de manera que el número total de puntos del diseño es $N = 2^k + 2k + n_0$.

Pruebas de significación de los coeficientes estimados para el modelo ajustado

Para estimar los coeficientes se requieren $N > k+1$ valores de respuesta (F). El análisis de los datos de las corridas se presenta en una tabla de análisis de varianza. La tabla presenta las diferentes fuentes de variación que contribuyen a la variación total de los datos.

La variación total recibe el nombre de suma de cuadrados total SST, se calcula de la siguiente manera:

$$SST = \sum_{u=1}^N (Y_u - \bar{Y})^2$$

donde Y_u es el valor observado en la u-ésima corrida.

La suma de cuadrados se compone por la suma de cuadrados debido a la regresión y la suma de cuadrados no tomada en cuenta por el modelo ajustado. La fórmula de la suma de cuadrados debido a la regresión es:

$$SSR = \sum_{u=1}^N (\hat{Y}_u - \bar{Y})^2$$

La suma de cuadrados residual, que corresponde a la no tomada en cuenta, se calcula de la siguiente forma:

$$SSE = \sum_{u=1}^N (Y_u - \hat{Y}_u)^2$$

En la Tabla 3.1 se observa una tabla de análisis de varianza, en ella (p) representa el número de términos del modelo ajustado.

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

Tabla 3.1. Análisis de varianza

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de Cuadrados
Regresión	p-1	SSR	SSR/p-1
Residuo	N-p	SSE	SSE/N-p
Total	N-1	SST	

La prueba de significancia de la ecuación de regresión ajustada tiene la siguiente hipótesis nula H_0 : Todas las β_s (excluyendo (β_0)) son cero contra la alternativa H_A : Al menos una de las β_s (excluyendo (β_0)) es diferente de cero. La prueba supone que el error se comporta normalmente, en ésta se utiliza el estadístico de prueba F , el cual se calcula:

$$F = \frac{SSR/(p-1)}{SSE/(N-p)}$$

Este se compara con una $F(p-1, N-p)$, si F calculada excede este valor la hipótesis nula se rechaza con un nivel de confianza de α . Esto significa que la variación explicada por el modelo es significativamente mayor que la variación inexplicable.

Además de esta prueba se puede hacer un análisis del ajuste del modelo con la R^2 , que es la proporción total de la variación de las Y_u s con respecto a la media que se puede explicar con la ecuación de regresión ajustada. Esta se calcula de la siguiente manera:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST}$$

Además se precisa del cálculo de la falta de ajuste por no-planaridad o curvatura, dadas por:

$$SSE_{ErrorPuro} = \sum_{j=1}^n \sum_{u=1}^{r_j} (Y_{ju} - \bar{Y}_j)^2$$

donde Y_{ju} es la u -ésima observación del j -ésimo punto del diseño. $u=1, 2, \dots, n$ $j=1, 2, \dots, n$
 $\bar{Y}_j$, es el promedio de las r_j observaciones del j -ésimo punto del diseño.

$$SS_{FaltadeAjuste} = SSE - SSE_{ErrorPuro}$$

La prueba de adecuación del modelo ajustado es:

$$F = \frac{SS_{FaltadeAjuste}/(n-p)}{SSE_{ErrorPuro}/(N-n)}$$

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

La hipótesis de suficiencia de ajuste con un nivel α de significancia se rechaza cuando el valor calculado del estadístico es mayor a $F_{(n-p, N-n, \alpha)}$ - Cuando la F calculada no es mayor el cuadrado medio residual es utilizado para estimar σ^2 y también se usa para probar la significancia del modelo ajustado.

3.1.2. Condiciones de realización de los ensayos. Ejecución del plan experimental. Procesamiento estadístico de los resultados.

Del análisis de una amplia bibliografía consultada y de las experiencias anteriores de nuestro grupo de trabajo podemos concluir que la producción exitosa por pulvimetalurgia depende de la selección adecuada y del control de las siguientes variables del proceso:

- a) características del polvo metálico.
- b) Preparación del polvo.
- c) Tipo de prensa o mecanismo compactador.
- d) Diseño de herramientas o matrices de compactación.
- e) Tipo de horno de sinterización.
- f) Composición de la atmósfera de sinterización.
- g) Elección del ciclo y parámetros de producción.

Por otra parte, es un hecho conocido de que sobre los indicadores de desgaste de los materiales influyen:

- h) la carga normal aplicada.
- i) La velocidad de deslizamiento entre las superficies rozantes.

En la presente investigación se mantendrán como constantes del proceso (invariantes internas) los aspectos a) al f) y h) e i), pues son controlables por el investigador de manera que se garantiza la reproductibilidad de los resultados y la no afectación de las respuestas por variaciones aleatorias de factores independientes. Sólo variarán a criterio del investigador los parámetros operativos del proceso (en nuestro caso el tiempo de permanencia de la pieza en el horno y la temperatura del mismo), pues precisamente se desea evaluar su influencia sobre las propiedades resultantes del material depositado.

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

Planteamiento del problema.

Se necesita investigar la dependencia de los parámetros de salida:

Y₁- Desgaste gravimétrico (g)

Y₂- Dureza Brinell (HB)

En la proceso de recuperación de cojinetes antifricción por pulvimetalurgia dilatométrica, con sinterización de polvo de bronce (10% Sn, 90 % Cu) sobre respaldo de acero y en atmósfera controlada neutra (de Nitrógeno), siendo los factores de entrada:

X₁-Temperatura de Sinterización (°C).

X₂-Tiempo de Permanencia (min).

Por otra parte, se desea lograr valoraciones en cuanto a las en:

Y₃- Porosidad (%)

Y₄- Adherencia (Cualitativo)

Y₅- Perfil microestructural (cualitativo)

Selección de la región de experimentación a partir del análisis de la información preliminar.

Durante el análisis de la información acumulada previamente acerca del proceso en estudio, se conoce que cuando se realiza el prensado en frío las temperaturas de sinterización del bronce varían en el rango 700-780 °C, y que la temperatura de sinterización se reduce cuando se realiza el prensado en caliente.

Por otra parte, se sabe de experiencias anteriores de recuperación de piezas por este método que al emplear temperaturas del orden de 740 °C y tiempos de permanencia de 75 min se logra la sinterización del polvo que empleamos en este experimento. Aunque no sabemos aún cuál es la combinación óptima, esta es una referencia para la selección de los niveles de los factores. Después del correspondiente análisis, definimos la región de experimentación estableciendo los niveles de los factores en la forma que sigue:

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

Tabla 3.2. Condiciones de los experimentos.

Designaciones	X1: Temperatura de sinterización (°C)		X2: Tiempo de permanencia (min)	
	Valor Físico	Valor codificado	Valor Físico	Valor codificado
Nivel principal	740	0	75	0
Intervalo de Variación (I_{xi})	40		15	
Nivel Superior (X_{si})	780	+1	90	+1
Nivel Inferior (X_{ii})	700	-1	60	-1

Selección del tipo de plan experimental:

Se seleccionó un tipo de plan experimental del tipo 3^k (dos factores de entrada a tres niveles) que es un plan factorial completo, pues son pocas variables de entrada. Se pretende ajustar a un modelo lineal para evaluar el comportamiento del material en función de los factores de entrada.

La selección de 780 °C como temperatura máxima a experimentar tiene dos propósitos: minimizar temperatura y, sobre todo, evitar transformaciones de fase martensítica- austenítica en el hacer 2X13 del molde exterior en el caso de los moldes cilíndricos del dispositivo dilatométrico, transformación que ocurre a 820 °C.

Para garantizar que la región de experimentación así definida se encuentra en la región de definición de los factores, fue necesario realizar el ensayo de condiciones más críticas, es decir, la corrida de tiempo y temperatura mínimos $X_1=700$ °C y $X_2=60$ min. Al desarrollar este ensayo, comprobamos que para esas condiciones el material sinteriza y por tanto la región de experimentación es válida.

Análisis de los resultados obtenidos con el diseño experimental.

Basados en las mediciones de las respuestas que se han realizado hasta ahora, y que deberán completarse para el tratamiento matemático posterior, se puede enunciar los siguientes resultados preliminares:

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

Tabla 3.3. Resultados de dureza (HB) por corridas.

Exp.	X ₁	X ₂	Y ₂	Y _{2(R)}	$\bar{Y}_2$
1	-1	-1	51.9	49.2	50.55
2	0	-1	59.5	56.4	57.95
3	+1	-1	62.4	61.9	62.15
4	-1	0	53.3	55.6	54.53
5	0	0	51.9	53.3	52.6
6	+1	0	49.5	46.3	47.9
7	-1	+1	54.3	57.2	55.7
8	0	+1	51.9	49.5	50.7
9	+1	+1	49.5	51.9	50.7

En la tabla 3.3. Y₂ es la dureza de la pieza _i, Y_{2(R)} es la dureza de la replica _i.

Con ayuda del Software MATLAB se determinaron los coeficientes del modelo:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \varepsilon$$

%betahat = regress(y,X1) ó betahat = X\Y

Intervalo de confianza para cada coeficiente

%[betahat,Ibeta,res,Ires,stats] = regress(Y,X,alpha);

Coef	Valor Estimado	min	máx
β_0	51.7611	48.3457	55.1765
β_1	0.0000	-1.8707	1.8707
β_2	-2.2500	-4.1207	-0.3793
β_{12}	-4.1625	-6.4536	-1.8714
β_{11}	-0.1667	-3.4068	3.0734
β_{22}	2.9833	-0.2568	6.2234

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

Esto es:

$$Y = 51.7611 - 2.2500 x_2 - 4.1625 x_1 x_2 - 0.1667 x_1^2 + 2.9833 x_2^2 + \varepsilon$$

$$x_1 = (X1 - 740)/80 \quad x_2 = (X2 - 75)/30$$

Coef	StdErr	tStat	pVal
51.761	1.5675	33.021	0.0000000
0.0000	0.85857	0.000	1.0000000
-2.25	0.85857	-2.6206	0.0223590
-4.1625	1.0515	-3.9585	0.0018984
-0.16667	1.4871	-0.11208	0.9126200
2.9833	1.4871	2.0062	0.0679180

Regression ANOVA

Source	df	SS	MS	F	P
Regr	5.0000	235.0735	47.0147	5.3149	0.0084
Resid	12.0000	106.1493	8.8458		
Total	17.0000	341.2228			

Con estos resultados es aceptado el modelo.

Usando ahora el modelo estimado, se obtienen las siguientes gráficas.

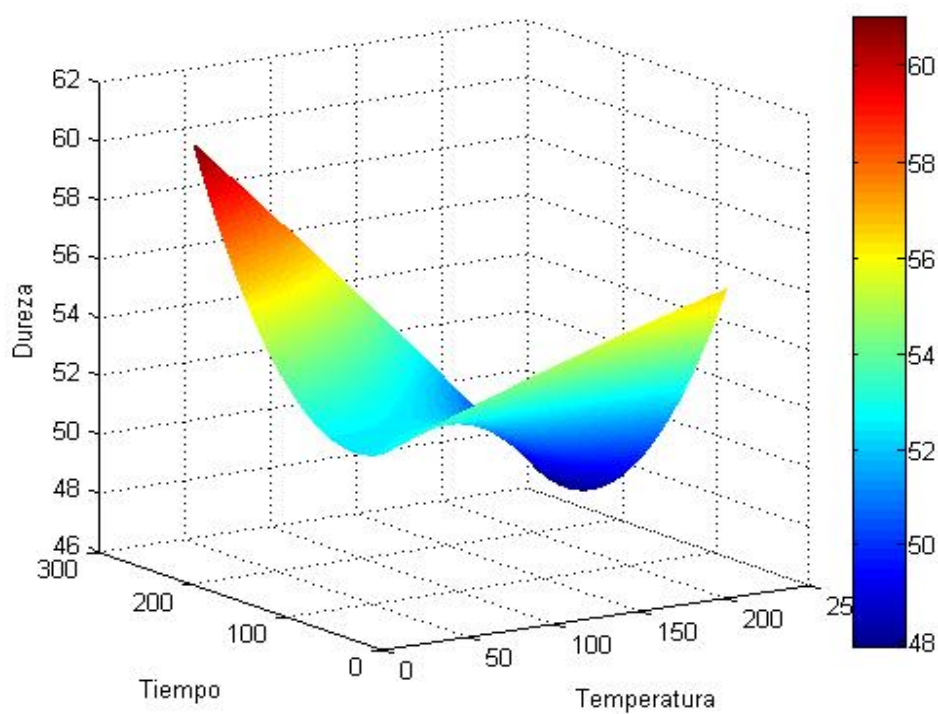


Figura 3.1. Gráfica de la función en R^3 .

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

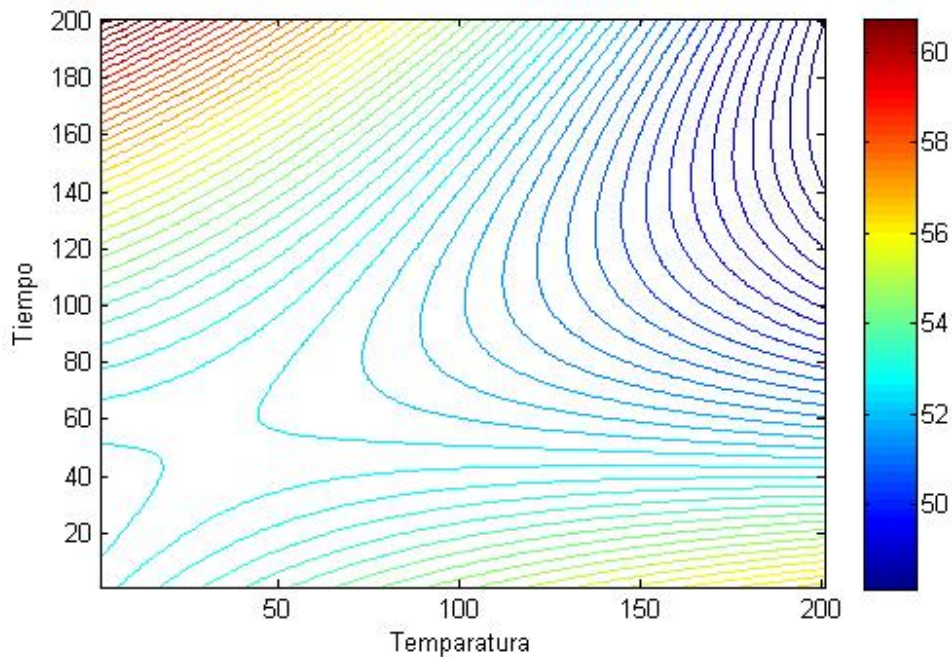


Figura 3.2. Gráfico de contornos, o curvas de nivel.

En la figura 3.2. Se describe la proyección de cortes a diferentes niveles. (de menor a mayor como se indica en la barra de colores)

Sobre la dureza Brinell: estadísticamente se aprueba el modelo ya que la dureza depende significativamente de la temperatura y del tiempo, este parámetro se mueve entre 50 y 60 HB en las piezas recuperadas, lo cual es menor que los 70 y 80 HB reportados en la literatura para el bronce al estaño fundido y mayor que los 40 HB del bronce comprimido en frío y luego sinterizado. Su valor se considera adecuado, aunque la teoría no establece una relación estricta entre la dureza y la resistencia al desgaste, sino que esta depende de un complejo número de factores.

Resistencia al desgaste. Procesamiento Estadístico.

Para determinar la resistencia al desgaste se procedió a la construcción de una máquina de ensayos tribológicos. Ver epígrafe 3.5.

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

Los resultados de este ensayo que se muestran en la tabla 3.4, no se ajustan a un modelo de segundo orden, por lo que se procedió al modelo de primer orden. Con la información obtenida en los ensayos de desgaste, ver anexo III, gráfico 3.1, permitió el procesamiento estadístico para investigar el modelo de dependencia del desgaste gravimétrico en función del tiempo de permanencia en el horno y la temperatura de sinterización.

Tabla 3.4. Resultados de los experimentos de desgaste.

Exp.	X ₁	X ₂	Y ₁	Y _{1(R)}	$\bar{Y}_1$
1	+	+	43.8	33.5	38.65
2	+	-	33.5	45.0	39.25
3	-	+	29.7	31.5	30.60
4	-	-	47.4	29.6	38.50

Como se puede ver la ecuación del modelo para el desgaste al cabo de 4 horas es:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2$$

Donde los coeficientes β_1 y β_2 son poco significativos por lo que Y es igual a:

$$Y = 36.75 \text{ mg}$$

o sea, la ecuación de una recta con pendiente cero.

Se obtiene entonces que el desgaste gravimétrico de la capa de bronce fabricada por pulvimetalurgia no depende significativamente del tiempo de permanencia en el horno ni de la temperatura de sinterización en la región de variación de esos factores en la presente investigación. Esto puede explicarse a partir de comprobar que para cualquier nivel de los factores tiempo y temperatura dentro de la región de experimentación aquí empleada, el material sinteriza adecuadamente (esto se confirma además con los resultados del análisis metalográfico y las pruebas de adherencia). Una vez que la sinterización ha avanzado lo suficiente para que se produzcan sus etapas fundamentales (contacto entre partículas, formación de los puentes de enlace, crecimiento de los puentes, redondeado de los poros) no se produce cambio esencial de las propiedades del material (a menos que se prolongue excesivamente el tiempo de permanencia a niveles que no tienen interés práctico, de decenas

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

de horas, para los cuales la literatura reporta un aumento progresivo de la densidad del producto).

Para comprender mejor el hecho de que una vez que el bronce al estaño 10% ha sinterizado no se produce ningún cambio esencial posterior, debe notarse en el diagrama de fases Cu-Sn que estos forman solución sólida, sin cambio de fase para la región de temperaturas aquí usadas, donde el único mecanismo posible de endurecimiento (excluyendo el de solución sólida por ser igual la solución en todos los casos) es la deformación plástica.

3.2. Interfase de Níquel Químico.

El niquelado químico es un procedimiento industrial por el que se deposita una aleación de Níquel-Fósforo sin ninguna fuente exterior de corriente.

Ofrece unas soluciones técnicas excepcionales por sus inmejorables cualidades de dureza, resistencia al desgaste, al rozamiento, a la abrasión y a la corrosión.

Sustituye a los tratamientos electrolíticos convencionales cuando se recubren piezas de formas complicadas, huecas, irregulares, donde existen zonas que no son accesibles a las líneas de corriente.

Sus características más remarcables son:

a) Espesor uniforme.

Proporciona una protección contra la corrosión exactamente igual en todas las zonas de la pieza. Se diferencia del recubrimiento electrolítico en que éste deposita espesores muy diferentes de un punto a otro de la pieza, empezando la corrosión en éstas zonas donde los depósitos son más débiles.

b) Propiedades variables según los tratamientos térmicos efectuados.

La influencia de los tratamientos térmicos se debe a que la deposición del Níquel Químico es una aleación, por lo que su estructura molecular cambia en presencia de la temperatura.

Los depósitos de Níquel Químico pueden aplicarse sobre la mayoría de metales: como fundiciones, aceros al carbono y aleados, aceros inoxidables, aluminio, cobre, cobalto, monel, níquel y aleados, oro, plata, uranio e incluso en ciertas materias plásticas termoestables como la baquelita, melamina, cerámica, vidrio, siempre y cuando apliquemos sobre su superficie un potente catalizador.

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

No pueden recubrirse directamente el cinc, cadmio, plomo, bismuto, antimonio y estaño porque estos metales impiden el depósito de Níquel por lo que se recubren con otro metal (ejemplo: cobre electrolítico) para su posterior niquelado.

El Níquel Químico compite con el Cromo Duro en que no es necesario su posterior rectificado, pero podemos asociarlo utilizándolo como bajo-capa, o sea, dando una primera capa de Níquel y seguidamente otra de cromo; el conjunto gana entonces en regularidad de espesor y conserva las excepcionales cualidades superficiales del Cromo Duro.

Puede ser utilizado como baja-capa en los casos del:

- Oro
- Aluminio cadmiado, estañado, plateado, dorado, etc., favoreciendo así posteriores soldaduras.

Su utilización proporciona ventajas económicas, como por ejemplo:

- Ganamos peso, sustituyendo un material aleado ligero niquelado por un aleado más pesado. De este modo en la Industria del Automóvil los aleados del aluminio niquelado permiten unos ahorros de peso remarcables y unas ventajosas propiedades superficiales en cuanto a la dureza, rozamiento, resistencia al desgaste.
- Podemos también disminuir el precio del costo del producto utilizando un material corriente niquelado antes que uno más pesado, como por ejemplo: la Industria Eléctrica reemplazando el cobre por aluminio estañado gracias a una capa anterior de Níquel Químico.

3.2.1 Propiedades del depósito de Níquel Químico.

A) Composición.

Níquel 90 a 92%

Fósforo 8 a 10%

Carbono 0,04%

Oxígeno 0,0023%

Nitrógeno 0,0047%

Hidrógeno 0,0016%

En la actualidad, el proceso de niquelado químico ha evolucionado susceptiblemente consiguiendo depósitos de altas prestaciones que se pueden acoplar a la necesidad de cada pieza.

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

Podemos distinguir dos tipos de depósito en función de su contenido en fósforo:

- El que podríamos llamar Níquel Clásico: recoge una concentración de fósforo entre el 6 y el 8%, presenta una resistencia a la corrosión de media a buena y una gran resistencia al desgaste y a la abrasión.
- El Níquel Técnico: presenta una concentración del 9 al 13% en fósforo. Son los que más se utilizan, puesto que su principal propiedad es la elevada resistencia a la corrosión, al desgaste y a la abrasión. La densidad disminuye así como la susceptibilidad magnética. Estos resultados se pueden mejorar con la aplicación de post-tratamientos.

B) Dureza.

La dureza del Níquel tal y como sale del baño es 480 a 550 Vickers = 49 Rockwell C = 470 Brinell HB. Esta dureza se puede elevar mediante un tratamiento térmico a 290°C durante 10 horas hasta los 900-1100 Vickers = 67-69 Rockwell C, para depósitos a partir del 10% en fósforo.

Para piezas niqueladas que trabajan en movimiento, rozamiento, etc, se recomienda en general como temperatura límite los 200°C. En piezas estáticas, de 300 a 350°C.

En comparación con los materiales de construcción usuales, la dureza del Ni-P en estado de deposición es relativamente elevada. De todos modos, esta dureza puede aumentar mediante tratamiento térmico. La dureza se puede medir únicamente con micro-durómetros y con cargas no superiores a 100 gr.

C) Adherencia.

Los depósitos de Níquel Químico se adhieren perfectamente a los sustratos (material base) siempre y cuando las superficies estén previa y correctamente preparadas.

En muchos casos un tratamiento térmico mejora la adherencia. La temperatura y duración del tratamiento depende del objeto buscado. Los recocidos por encima de 300°C, deben ser efectuados en vacío. Esta resistencia alcanza su valor máximo después de un tratamiento térmico a 650 °C, lo que corresponde solamente a una dureza de 600 Vickers.

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

D) Porosidad.

Debido a su estructura amorfa, el recubrimiento de Níquel aplicado químicamente carece prácticamente de poros, siendo suficiente un depósito de 10 μm sobre una probeta de acero perfectamente pulida para que no se manifieste ninguna porosidad. En cuanto a la ausencia de poros en comparación con el espesor de capa, depende fundamentalmente del tipo de baño empleado.

E) Soldabilidad.

Las piezas niqueladas son perfectamente soldables con plata o aleados de plomo-estaño. Una capa de 5-10 micras es suficiente para soldar entre sí aluminio o aceros inoxidables.

La soldadura con arco o al soplete no está recomendada una vez las piezas estén niqueladas ya que el fósforo del depósito se difumina en la soldadura y la vuelve frágil. En este caso es preferible soldar antes de niquelar.

H) Uniformidad y homogeneidad de la capa.

Con tal que la solución del baño pueda circular libremente, y alcanzar toda la superficie de la pieza, la deposición de la capa será perfectamente uniforme independientemente del contorno de la pieza. En los casos más desfavorables, las variaciones de espesor se encuentran en el intervalo de 10%, lo que implica en la mayoría de las ocasiones, que si la pieza está rectificada, después de niquelada no precisará de un rectificado posterior. Estas propiedades son muy de tener en cuenta en aquellas piezas que por su complejidad no son factibles de proceder a su rectificado.

Como puede comprobarse, a más concentración de fósforo en la aleación, mayor resistencia a la corrosión, ahora bien: los tratamientos térmicos efectuados sobre Níquel Químico, hacen bajar sensiblemente los valores obtenidos.

Como norma, podemos indicar que el Níquel Químico presenta un magnífico comportamiento frente a los alcalis, buen comportamiento frente a los componentes neutros, orgánicos e inorgánicos no oxidantes y frente a la mayoría de los ácidos orgánicos e inorgánicos diluidos, siempre y cuando el Ph sea superior a 5.

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

Aplicaciones

Las propiedades del Níquel Químico permiten aplicarlo en aquellos casos en que el fin del recubrimiento sea realizar una o varias de las misiones siguientes:

1. Resistir a la corrosión
2. Resistir al desgaste
3. Aumentar la dureza
4. Disminuir los coeficientes de fricción
5. Recuperación de las piezas fuera de cotas
6. Permitir o facilitar la soldadura

Principales ventajas del Níquel Químico.

- a) Aumentar la vida útil de las piezas
- b) Realizar un ahorro de peso reemplazando un metal de base pesado por otro metal más ligero niquelado (aluminio, titanio, como caso particular de aplicación al material aeronáutico).
- c) Permitir el uso de materiales corrientes en lugar de materiales más caros (acero ordinario tratado al níquel químico en lugar de acero inoxidable).

A partir de la información anterior y de las condiciones con que cuenta la Universidad se precedió al desarrollo de la tecnología de Níquel Químico para la fabricación de cojinetes bimetálicos.

3.2.2. Tecnología de Níquel Químico.

1. Limpieza mecánica: Eliminar todas las crestas de las superficies dejadas por el maquinado.
2. Desengrase: Se coloca un recipiente con agua y detergente en baño María durante 10 minutos y se limpia la superficie de las piezas con ayuda de un cepillo, hasta eliminar la grasa o aceite.
3. Enjuagar en agua corriente.
4. Decapado. Se realiza en ácido clorhídrico al 5%.
5. Enjuagar en agua corriente.

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

6. Baño de níquel químico en una solución de sulfato de Níquel con concentración de 20 g/l, Ph 5.8 a una temperatura de 98 °C y un tiempo de 25 minutos, obteniéndose una capa de níquel depositada sobre el buje de acero que oscila entre 7 y 8 μm .
7. Enjuagar y secar.

3.2.3. Resultados del análisis químico de la tecnología utilizada.

El análisis químico de la tecnología utilizada se realizó por difracción de rayos X en el microscopio electrónico de barrido de la CUJAE, con diámetro de sonda de 2.02 μm , para tres puntos en la región de interfase entre el respaldo de acero y el cobre. Como se esperaba el Níquel difundió bien en el Acero, en el proceso de sinterización a 740 °C, ya que este elemento no forma carburos y difunde sustitucionalmente en el Hierro (Acero), por otro lado el Cobre y el Níquel presentan solubilidad total o ilimitada por lo que la inter difusión entre el Níquel (capa depositada químicamente) y la base de Cobre (Bronce depositado en forma de polvo) es muy buena. En los difractogramas se observa como resultado el buen proceder de la tecnología usada, es decir, lo bien que ha difundido el cobre en el níquel, el níquel en el cobre y el níquel en el acero, ver anexo III, gráfico 3.2, 3.3 y 3.4.

3.3. Procesos de Acabado. Tratamientos por deformación plástica superficial.

Las operaciones de acabado tienen gran importancia porque se emplean para la terminación final de las piezas y de ellas depende mucho el funcionamiento posterior de las mismas. Éstas operaciones pueden ser clasificadas en primarias, como el rectificado, donde se logra un acabado superficial Ra promedio entre 0,1 y 1,6 μm , y secundarias, con las que se logra obtener un acabado Ra promedio superior pero son menos empleadas. Entre ellas están:

1. Superacabado (Superfinish). Acabado superficial: 0,025 – 0,2 μm .
2. Lapeado (Lapping). Acabado superficial: 0,05 – 0,4 μm .
3. Pulido o Alisado (Polishing). Acabado superficial: 0,1 – 0,4 μm .
4. Bruñido (Burnishing). Esta operación tecnológica puede realizarse por:
 - Remoción de metal o arranque de virutas con herramientas abrasivas. La operación es conocida también como Joneado (Honing), con valores de acabado superficial de 0,1 – 0,8 μm .
 - Deformación plástica superficial (DPS).

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

Los procesos de deformación plástica superficial se pueden clasificar según el elemento deformante empleado. Entre los más conocidos están:

1. Bruñido por rodillo (Soller burnishing):
2. Bruñido por bola (Ball burnishing): este proceso está ampliamente difundido y ofrece casi las mismas ventajas del anterior. Se puede realizar con diferentes tipos de dispositivos que clasifican el proceso según la forma de sostener la bola en la herramienta:
 - Mecánicamente (por muelle).
 - Hidrostáticamente.
 - En una guía (para diámetros interiores).
3. Bruñido por herramienta de diamante (Diamond burnishing): se emplea para alisar, logrando un buen acabado en superficies cilíndricas exteriores de cualquier diámetro y en interiores de gran diámetro, así como en superficies planas frontales. Se recomienda con efectividad para piezas con dureza superior a 50 HRC.
4. Bruñido de baja plasticidad (Low plasticity burnishing): Se realiza con una herramienta de bola sostenida hidrostáticamente, en piezas de geometría compleja que van a trabajar a altas temperaturas, donde existirá un relajamiento de la capa compresiva por dichas temperaturas. Este bruñido origina tensiones residuales comprensivas altamente profundas y resistentes al calor con una deformación plástica mínima.
5. Bruñido vibratorio o vibrorodilado (Vibratory burnishing): Esta operación puede estar combinada con una acción de golpeteo que requiere el uso de dispositivos y de una máquina especial, y se puede lograr con el empleo de levas o con herramientas especiales con movimiento cicloidal de manera recíprocante – traslatoria. Puede golpear la superficie de la pieza hasta 2 000 veces por minuto lográndose, en ocasiones, un aumento del endurecimiento superficial por deformación de hasta un 30%.
6. Lanzamiento de granallas o chorreado de municiones (Shot peening): En este proceso un torrente de metal, vidrio o partículas de sílice es aplicado con aire a alta velocidad contra la superficie de la pieza metálica de una manera definida y controlada. Se emplea en piezas que trabajarán sometidas a esfuerzos cíclicos.

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

7. Impacto por vibración ultrasónica (Ultrasonic vibration impact): Se realiza a partir de una herramienta especial de bruñido ultrasónico conectada a una fuente y con ayuda de un fluido de trabajo, la profundidad de la capa deformada es pequeña (respecto a otros procesos).
8. Impacto por láser (Laser shock): Bajo la irradiación del láser de alta potencia, una onda de choque es generada. En este caso el láser absorbe la energía del calor de una fina capa superficial a alta temperatura. La evaporación de la superficie genera una ola de choque de compresión la cual se propaga dentro de la pieza y un plasma caliente de baja densidad se expande en dirección a la irradiación del láser. La ola de choque generada altera las micro estructuras superficiales y el estado de los niveles de tensión.
9. Combinados: Son procesos donde se combinan las ventajas de uno con las del otro. Entre otros se han visto:
 - De torneado electroquímico y bruñido por rodillo.
 - De corte del metal y bruñido por bola.
 - De maquinado por descarga eléctrica (electroerosivo) y bruñido por bola.
 - De lanzamiento de granallas y bruñido por bola.

También hay elaboración de superficies por deformación plástica en ciertas herramientas de diseño muy especial, como algunas de las que se emplean en el proceso de brochado. En dichas brochas las últimas aristas cortantes en realidad no remueven metal sino que repasan o alisan la superficie deformándola plásticamente, mejorando así la calidad superficial y obteniendo otras ventajas.

Estos procesos por D.P.S se eligen en dependencia de las dimensiones, la configuración geométrica, el material de la pieza a tratar, condiciones de producción, entre otros factores, y para la aplicación efectiva de los mismos en la producción es necesario realizar investigaciones, ensayos y experimentos previos que permitan alcanzar el efecto óptimo, teniendo en consideración las condiciones concretas de explotación de las piezas a elaborar.

El bruñido vibratorio o vibrorodilado y el lanzamiento de granallas son métodos dinámicos, pues se ejerce una acción dinámica durante la cual la fuerza actuante sobre la superficie cambia con periodicidad. El resto de los métodos se pueden considerar estáticos, pues la herramienta actúa sobre la superficie de la pieza ejerciendo una fuerza constante.

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

Después de establecidos los procesos de tratamiento por deformación plástica superficial más importantes, se puede afirmar que el bruñido por rodillo y el bruñido por bola son los tratamientos más utilizados en la producción científica revisada.

3.3.1. Bruñido por rodillo

Condiciones o premisas tecnológicas que deben tenerse en cuenta para la realización del bruñido por rodillo:

1. Que exista una superficie pre-maquinada con un buen acabado superficial. Es importante el buen grado de rugosidad (torneado fino) previo dado por un adecuado régimen de corte y herramientas de corte en buen estado, y debe ser un acabado uniforme, no tener desgarraduras, ni estrías, ni presencia de virutas.
2. Que exista una superficie pre-maquinada debidamente dimensionada y exacta. En este proceso el diámetro exterior disminuirá. Con el objetivo de obtener la pieza dentro de la tolerancia dimensional requerida es importante previamente dimensionar la pieza exacta y adecuadamente, teniendo en cuenta dicha variación en el diámetro que dependerá de:
 - Material de la pieza en bruto
 - Dureza inicial
 - Fuerza compresiva controlada
 - Número de pasadas
3. Suficiente espesor en la pieza a bruñir. Para resistir la fuerza compresiva de bruñido la pieza debe tener suficiente espesor. En casos de piezas cilíndricas huecas el espesor debe ser superior al 20% del diámetro interior. Un insuficiente espesor de la pared provocará en la superficie ondulaciones o falta de cilindridad.
4. Lubricación y líquido refrigerante: se debe emplear un fluido de trabajo limpio. Dicho fluido actuará como lubricante para disminuir la fricción, como refrigerante para permitir la transferencia del calor generado y limpiará la superficie a bruñir de partículas finas y virutas. Esto le ofrece una vida más larga a la herramienta. Los líquidos de trabajo pueden emplearse virtualmente en cualquier material. Además deben ser estables al agua, resistentes a la espuma y a las bacterias. También se reporta el uso del keroseno, aceite hidráulico, aceite para motores de combustión interna,

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

aceite industrial y aceite de engranajes. Para reciclar dichos fluidos se requiere de un filtro.

Aplicaciones

Según diferentes autores pueden ser bruñidas todas las piezas que se ensamblan y que requieren un gran nivel de acabado en las superficies de contacto y un fácil desmontaje, entre algunas de ellas están:

- Cojinetes de deslizamiento
- Láminas de rotores y estatores de motores eléctricos
- Partes y piezas de equipamiento hidráulico y neumático (bombas, turbinas, cilindros y compresores, con superficies de sellaje preciso)
- Árboles y ejes (zonas donde van montados los cojinetes de rodamiento y otros elementos de máquinas)
- Utensilios del hogar
- Piezas para la industria militar (ánima de las piezas de artillería convencional y reactiva), aeronáutica y aeroespacial (piezas de motores y turbinas), automotriz (pistones, camisas, cigüeñales, árboles de leva, asiento de válvulas), química, electrónica y textil, entre otras.

Ventajas.

- Buen acabado superficial. Se pueden lograr valores de acabado superficial R_a de 0.05 a $0.5 \mu m$, conocidos como acabado espejo.
- Endurecimiento Superficial. Se crea por la deformación extensiva de dislocaciones y en ocasiones debido a la formación de otras fases generadas durante la deformación. Además el bruñido condensa la estructura del grano de la superficie del metal provocando una compactación de la superficie y por tanto un aumento de la dureza superficial de un 5 a 10 % o más.
- Precisión. Se pueden obtener tolerancias estrechas con medidas exactas.
- Provoca mejoras en las propiedades físico mecánicas de la superficie, logrando aumentar la vida útil de la pieza. Aumenta la resistencia al desgaste.
- Elimina o reemplaza costosas operaciones secundarias de acabado en máquinas de alto consumo de energía.

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

- Puede corregir los defectos que pueden haber aparecido en operaciones previas de maquinado tales como conicidad, falta de cilindridad y otros.
- Las diferentes piezas de estas herramientas son intercambiables, por lo que resulta sencillo, fácil y rápido el mantenimiento y el cambio de piezas gastadas o deterioradas tales como rodillos, rodamientos, ejes, etc.
- Elaboración rápida, ahorra tiempo y aumenta la productividad, pues el proceso es breve, comparado con otros similares.
- Es un proceso más limpio, pues no generan desperdicios, al no haber arranque de virutas, y se ahorra materia prima.
- Puede realizarse en máquinas herramientas convencionales y en máquinas herramientas con control numérico.

3.3.2. Operaciones Post Sinterizado.

Dentro de las tareas practicadas en el nuevo método de recuperación y fabricación de piezas por “Pulvimetalurgia Dilatométrica”, se requiere de un maquinado inicial y final de los cojinetes de deslizamientos a recuperar, recuperados y/o fabricados. En el caso específico de los cojinetes de deslizamiento de biela del tractor Komatsu se desarrolló un dispositivo especial para realizar estas operaciones de maquinado, aprovechando la existencia de un Taladro Vertical con Control Numérico en la Empresa Oleohidráulica de Cienfuegos utilizando una biela como se muestra en la figura 3.3. Cuando los cojinetes son de apoyo o del árbol de levas hay que diseñar y construir un dispositivo especial para cada caso.



Figura 3.3. Dispositivo especial para el maquinado de cojinetes cilíndricos.

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

Otra solución buscada para dar acabado a los cojinetes de deslizamiento es el Bruñido por rodillo, para la cual se utilizó el Torno Universal C13MB con dispositivo Especial Hidráulico para el maquinado profundo en la Empresa Oleohidráulica de Cienfuegos, por la disponibilidad de este sistema que se utiliza para el bruñido interior de las camisas de los cilindros hidráulicos, de diámetro en el entorno al diámetro interior de los cojinetes de deslizamiento del tractor Komatsu y del árbol de leva.

Resultados de las operaciones Post Sinterizado:

- Buen acabado superficial.
- Endurecimiento Superficial.
- Precisión.
- Aumenta la resistencia al desgaste.
- Cilindricidad.

3.4. Diseño, construcción y montaje de una instalación para la impregnación en aceite.

La construcción de la instalación necesita de un riguroso diseño o selección de sus partes, ya que el experimento requiere de parámetros que deben permanecer estables durante la explotación de la misma.

1- Presión de vacío de $0,4 \left(\frac{kgf}{cm^2} \right)$

2- Temperatura de $80 \text{ } ^\circ\text{C} \pm 5 \text{ } ^\circ\text{C}$.

En la figura 3.4. se muestra el esquema de partes y componentes de la Instalación experimental para la impregnación en aceite.

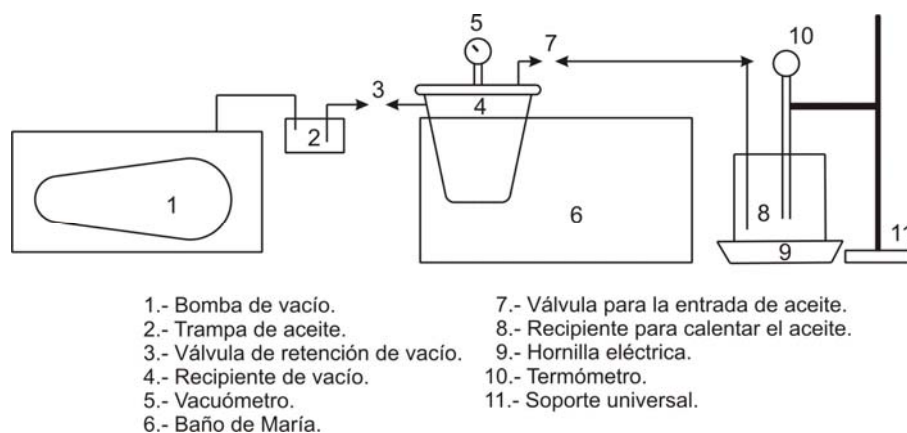


Figura 3.4. Esquema de partes y componentes de la estación experimental.

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

Procedimientos operacionales de trabajo para la impregnación de aceite.

- 1- Limpieza de las piezas que se someten al proceso de impregnación en aceite.
- 2- Secado de las piezas en la estufa a una temperatura de $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante un tiempo no menor de 5 min, lo que permite evaporar el solvente residual en los poros.
- 3- Introducir las muestras en el recipiente donde se realiza el vacío, durante un tiempo no menor de 10 min antes que las piezas queden sumergidas en aceite, a presión de $0,4 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$.
- 4- Se procede a instalar el Baño de María hasta que alcance temperatura igual a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ y en la hornilla se calienta el aceite en otro recipiente a esa temperatura.
- 5- Después de lograr esta temperatura en el baño y en el aceite, se introduce la olla en el baño para lograr el equilibrio de la temperatura en el baño y en el aceite caliente, y que este se mantenga en el intervalo normado.
- 6- Se suministra el aceite por la parte superior de la olla manipulando la válvula de la tapa y manteniendo el vacío, esto se realiza hasta que las muestras queden sumergidas en aceite. Se mantienen a la presión y temperatura durante un tiempo dado para el proceso de impregnación. Concluido este tiempo se procede a retirar el vacío, y las piezas no se extraen del aceite hasta que no se encuentre a temperatura ambiente.
- 7- Concluido todo el proceso se apagan todos los equipos y cuando el aceite se enfría se escurre el aceite de las muestras.

Determinación del aceite impregnado en las muestras.

Se determinó utilizar el método de pesada, ya que es un método sencillo, de fácil ejecución y exacto, y solo depende de una balanza con precisión de 0.01 %, obteniéndose los resultados con rapidez.

Metodología para determinar el aceite impregnado.

- 1- Las muestras se someten al proceso de limpieza en el extractor Soxhlet. Este proceso se debe realizar 6 veces como mínimo, con un solvente adecuado.
- 2- Las muestras se someten al secado en la estufa. Esto se realiza a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y en un tiempo no menor de 5 min, para evaporar el solvente residual de los poros.
- 3- Se realiza la operación de pesada, obteniéndose el peso real de las muestras.

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

- 4- Las muestras serán impregnadas en el tiempo que determinará el experimento para lograr el porciento de saturación en el tiempo óptimo.
- 5- Se extraen las muestras de la cámara de vacío, después que el aceite está a temperatura ambiente, las mismas se escurren y se limpian suavemente con un paño mojado de solvente para eliminar el aceite en exceso en la superficie de la muestra.
- 6- Se repite la operación de pesada y este es el peso de la muestra impregnada.
- 7- Determinación del porciento de saturación de las muestras: $\% = (m_1 - m_2) / m_2 * 100$

Se realizó un experimento a $P = \text{const}$ y $T = \text{const}$ con el objetivo de determinar el tiempo óptimo de impregnación de aceite, para ello se tomaron 5 muestras de forma aleatoria y se realizó la impregnación en aceite para diferentes tiempos y se trazó la curva característica de la misma, obteniéndose que el tiempo óptimo para la impregnación de las piezas es de 5 min. Ver anexo III, gráfico 3.5.

3.5. Tribología. Ensayos.

La experimentación en tribología consta de varias etapas interdependientes de desgaste, pero que pueden ordenarse como sigue:

1. Estudio de las piezas desgastadas por su explotación: análisis del estado superficial y del régimen de fricción, microdureza, composición de fases, rugosidad y descripción del tipo de desgaste.
2. Estudio de modelos en máquinas de fricción a nivel de laboratorio, de muestras de las piezas reales, simulando tanto como sea posible las condiciones de carga y el régimen de fricción del par tribológico en estudio.
3. Ensayo (en las mismas condiciones de laboratorio) de un grupo de materiales o recubrimientos alternativos, a condiciones de lubricación distintas, etc, que permitan mejorar el trabajo del par. Estudiar comparativamente el estado superficial después del ensayo, coeficiente de fricción, desgaste e intensidad del desgaste, y emitir conclusiones según criterios técnicos-económicos.
4. Realización de ensayos de banco de los materiales seleccionados, simulando las condiciones de explotación del equipo.

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

5. Evaluación del comportamiento del par en condiciones reales de explotación, estudio de las piezas explotadas y conclusión sobre la efectividad de los materiales en estudio.

Esta secuencia permite obtener resultados fiables en el trabajo del sistema tribológico en estudio.

Método de Determinación del Desgaste por Diferencia de Peso:

El desgaste gravimétrico se determina en este caso, en la máquina de ensayos tribológicos MFR-01. Esta máquina de ensayos tribológicos MFR-01 fue construida en los talleres de la Empresa Oleohidráulica de Cienfuegos, según proyecto de las Universidades de Cienfuegos y Central de Las Villas, es similar al tribómetro internacionalmente utilizado en ensayos de desgaste y fricción tal como aparece descrito en artículos publicados en las revistas Wear 1995'1996 por el área de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Oviedo, España.

Esta máquina (cuyo esquema funcional aparecen en la figura 3.5. permite ensayar pares de fricción por deslizamiento en una amplia gama de velocidades y cargas, con lubricación o sin ella. Está compuesta por tres elementos fundamentales: una muestra que trabaja como árbol y otra que reproduce al cojinete, y el medio lubricante en la zona de contacto.

Por otra parte, en cuanto a las condiciones de ensayo del par tribológico se establecieron para los experimentos los valores de: presión normal $\sigma = 105 \text{ kgf/cm}^2$, la cual es un carga media, teniendo en cuenta que la carga máxima admisible para el bronce Cu-Sn 10% es alrededor de 280 kgf/cm^2), velocidad de deslizamiento $v = 0.5 \text{ m/s}$, la cual es pequeña, pero estábamos limitados por las disponibilidades constructivas de la máquina de ensayos. En todos los casos, se controlaron estos parámetros para garantizar su similitud al ensayar las distintas muestras, para obtener así el efecto de la variación de X1 y X2 sobre la resistencia al desgaste bajo condiciones fijas de carga y velocidad. Se realizaron los ensayos en condiciones de existencia de lubricación, empleando para ello el aceite Multi-B convencionalmente usado en automóviles.

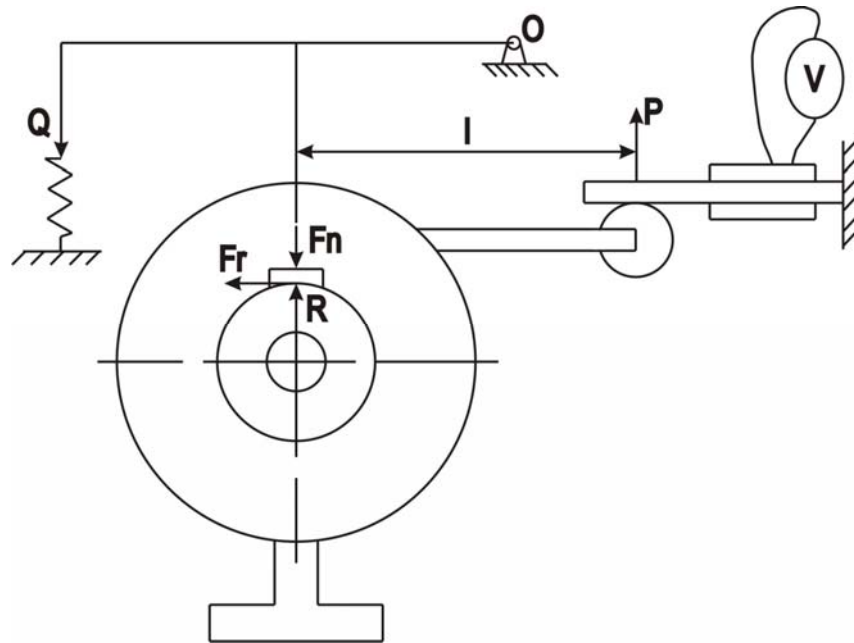


Figura 3.5. Esquema de las fuerzas actuantes durante el ensayo

Las formas y dimensiones de las muestras se representan en la figura 3.6. La muestra del cojinete tiene la forma de un segmento con área nominal de contacto entre 0.1 y 1.0 cm^2 y se comprime contra un contracuerpo cilíndrico de diámetro 50 mm .

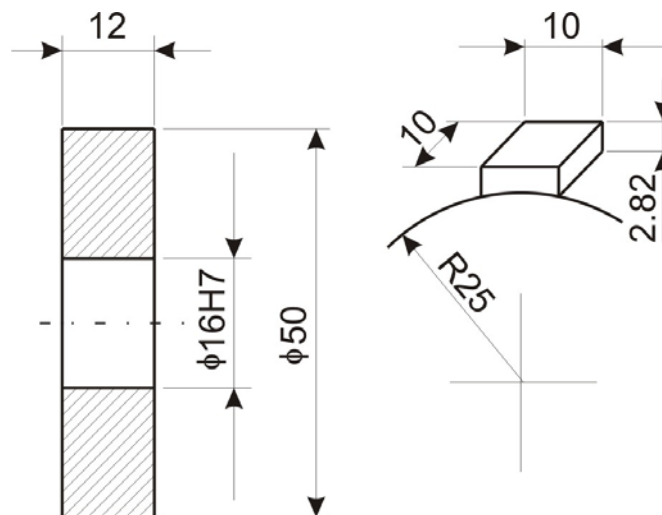


Figura 3.6. Forma y dimensiones de las muestras a ensayar.

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

El contracuerpo se monta sobre el árbol central, que gira a una velocidad seleccionada, tal que se obtenga la velocidad de deslizamiento deseada. En la carcasa, sobre cojinetes de rodamiento, se encuentra el carro que puede girar coaxialmente en el árbol central, y que no se representa en la figura 3.5. para simplificar el esquema. La palanca de carga se encuentra situada en el carro y en el mismo se coloca la muestra de cojinete apoyada sobre el contracuerpo, y con la ayuda de un muelle calibrado se suministra la carga radial.

Cuando se realizan los ensayos, la fuerza de fricción que surge en las probetas tiende a girar el carro, lo cual crea una fuerza flectora (P) sobre el Terminal inductivo o extensométrico que se utiliza como elemento captador.

De esta manera se pueden establecer a partir de ensayos en la máquina MFR-01 las propiedades y capacidad de trabajo del par tribológico, su microestructura y los valores de indicadores fundamentales del desgaste.

Metodología de determinación del coeficiente de fricción (f) y evaluación del desgaste gravimétrico (W_g) en la máquina de ensayos MFR-01.

En la figura 3.5. se muestra el esquema de las fuerzas actuantes durante el ensayo, de la cual se realiza el siguiente análisis:

$$M = P \cdot L = F_f \cdot R \quad [N \cdot m]$$

Que es la condición de equilibrio estático. Por tanto:

$$F_f = \frac{P \cdot L}{R} \quad [N]$$

Como (L) y (R) en (m) son valores constantes, la fuerza de flexión aplicada al Terminal inductivo (P), depende únicamente de la magnitud de la fuerza de fricción (F_f). Durante el ensayo se mide el valor de (P) por el captador inductivo y se sustituye en la ecuación (2) para obtener el valor de (F_f); utilizando esa misma ecuación.

Una vez conocido el valor de (F_f) se determina el coeficiente de fricción (f) por la relación:

$$f = \frac{F_f}{F_n}$$

Donde:

(F_f)-fuerza de fricción

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

(Fn)-Fuerza normal

El desgaste en nuestro caso se evalúa por diferencia de peso, este método generalmente se utiliza para la determinación del desgaste de muestras pequeñas., las cuales se pesan antes y después de los ensayos. Antes del pesaje deben ser lavadas, eliminando los productos del desgaste y las grasas superficiales.

La característica fundamental de este método para la determinación de los valores absolutos del desgaste está dado por el peso del producto desprendido por unidad de área nominal en unidad de recorrido de fricción.

La determinación de los valores finales del desgaste por diferencia de peso se calcula tomando en consideración que el desgaste es uniforme en toda la superficie de fricción. La característica lineal del desgaste ((Ih), adimensional) representa la altura de la capa superficial desgastada en unidades de recorrido de fricción, según la ecuación:

$$Ih = \frac{Q}{An \cdot \mu \cdot L \cdot 10^{-8}}$$

Donde:

(Q)-Diferencia de peso por el efecto del desgaste (mg).

(An)- área nominal de contacto (cm²).

(L)- recorrido de fricción (Km).

(μ)- peso específico del material $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$

Existen varios indicadores de desgaste, pero sólo nos auxiliaremos de dos de ellos en nuestro trabajo.

1- Desgaste gravimétrico (Wg): caracteriza la pérdida de masa que ha tenido lugar durante el período de desgaste. Se determina como:

$$Wg = Go - Gf \quad (mg)$$

Donde:

(Go)- peso inicial de la muestra (mg).

(Gf)- Peso final de la muestra (mg).

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

2- Intensidad gravimétrica de desgaste (I_g): es la relación entre el desgaste gravimétrico (Wg) y el recorrido de fricción que lo produce (Sf). Se calcula por:

$$I_g = \frac{Wg}{Sf} \quad \left(\frac{mg}{Km} \right)$$

Para las pesadas deben utilizarse balanzas analíticas con precisión no inferior a 0.001 g .

Para determinar el recorrido de fricción durante el ensayo empleamos:

$$Sf_1 = V \cdot t \cdot 10^{-3} \quad (Km)$$

Donde:

(Sf_1)-Recorrido de fricción de la probeta cilíndrica (m).

(V)-Velocidad de deslizamiento $\left(\frac{m}{s} \right)$.

(t)-Tiempo de ensayo (s), fluctúa entre 4 y 10 horas.

Para la probeta pequeña se emplea:

$$Sf_2 = K \cdot Sf_1 \quad (Km)$$

$$K = \frac{Anc}{Anp}$$

Donde:

(Sf_2)- Recorrido de fricción de la probeta pequeña (cojinete) (m).

(K)- Factor de recubrimiento.

(Anc)- Área nominal de la probeta cilíndrica.

(Anp)- Área nominal de la probeta pequeña.

Las áreas nominales de contacto se determina por:

$$Anc = a_{ens} \cdot b \quad (cm^2)$$

$$Anp = 2\pi \cdot r \cdot b \quad (cm^2)$$

Donde:

(a_{ens})- Longitud del arco de contacto de la probeta pequeña (cm).

(r)- Radio de la probeta cilíndrica (cm).

(b)- Ancho de las probetas (cm).

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

Después de realizados todos los ensayos tribológicos se puede observar en la tabla 3.5. el comportamiento al desgaste de cada pieza en el tiempo.

Tabla 3.5. Resultado del Desgaste gravimétrico de las piezas:

Piezas	1 hora	3 hora	4 hora
Pieza patrón	386.9 mg	403.6 mg	-
Pieza 1	9.8 mg	33.6 mg	38.15 mg
Pieza 2	10.5 mg	33.3 mg	39.25 mg
Pieza 3	11.8 mg	23.6 mg	30.6 mg
Pieza 4	14.7 mg	33.9 mg	36.6 mg
Promedio (1-4)	11.7 mg	31.1 mg	36.15 mg

En el anexo III, gráfico 3.1, se muestra las curvas de desgaste gravimétrico en el tiempo de las piezas analizadas.

Se obtuvo como información en los ensayos que la resistencia al desgaste del bronce poroso fabricado por pulvimetalurgia es mayor que el bronce de la pieza de fábrica. Al desgastar las piezas fabricadas (con espesor de la capa del orden de 160 μm), estas sufrían un desgaste que tendía al asentamiento y conservaban la capa de bronce; al cabo de cuatro horas de ensayo se iban aproximando a la base de acero. El patrón de fábrica empleado para la comparación fue un cojinete de KVD, al cual se le eliminó la capa de bronce de unos 0,3 mm (pues es un cojinete trimetalico). En un primer ensayo ese cojinete sufrió un desgaste intenso y mostró la base de acero ya al cabo de una hora; en otro ensayo el desgaste casi llegaba al acero al cabo de una hora, y descubrió el acero al cabo de la segunda hora. Fue imposible ensayar esa capa más allá de las tres horas pues había sido ampliamente destruida.

Mientras que el desgaste de las piezas pulvimetalúrgicas al cabo de una hora ofreció un promedio de 11.8 mg, el desgaste del patrón de fábrica fue de 386.9 mg, o sea este último sufrió un desgaste mucho mayor. Al cabo de tres horas, el desgaste de las piezas estudio era como promedio 31.1 mg y el de la pieza de fábrica 403.6 mg.

La amplia diferencia entre los desgastes que aparecen en la capa pulvimetalúrgica y la capa fundida de fábrica puede explicarse por dos factores: el hecho de que el cojinete pulvimetalúrgico poroso trabaja mejor en condiciones de lubricación; y por la diferencia de

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

composición química de la capa de bronce del cojinete de KVD que es de Cu-Pb al 30 %, diferente en calidad a la de Cu-Sn al 10%. Por supuesto, los ensayos se realizaron para unas condiciones específicas (lubricación, carga moderadamente alta, velocidad de deslizamiento baja) y pudiera suceder que en otras condiciones, cuando aumente la carga y la velocidad, y por tanto el cojinete poroso sufra mayor deformación plástica, sea otro el comportamiento de ambos materiales (por lógica, debe reducirse un poco la diferencia entre las razones de desgaste). Sin embargo, según los ensayos de laboratorio realizados hasta ahora puede asegurarse que la resistencia al desgaste del cojinete pulvimetalúrgico en pares tribológicos que tengan lubricación es muy buena.

3.6. Resultados de la recuperación y fabricación de los cojinetes de deslizamiento por prensado en caliente bajo fuerzas dilatométricas.

3.6.1. Ensayos experimentales.

Sobre la Microestructura: la observación microscópica confirma la influencia directa del tiempo y la temperatura en la calidad de la sinterización, que es en esencia un proceso difusivo. En particular, las corridas de mínima temperatura muestran: para tiempo mínimo (1), la formación de los puentes de enlace no es totalmente adecuada, presentando muchas partículas mal sinterizadas y subcadenas de poros; para nivel medio del tiempo (4) el problema anterior existe pero es menos pronunciado, se aprecia mejor enlace entre la capa depositada y el bronce base; para nivel superior de tiempo (7) se establecen bien los puentes de enlace y prácticamente no se distingue línea divisoria entre los broncees. Para nivel de temperatura media se tiene: con tiempo mínimo (2) no hubo buena sinterización y son frecuentes las partículas de escaso enlace; para tiempo medio (5) no aparecen cadenas de poros, el enlace es satisfactorio y casi desaparece la línea divisoria entre los broncees; en el nivel superior de tiempo (8) la sinterización es adecuada y es satisfactorio el enlace entre la capa depositada y la capa base. Para nivel de temperatura superior se obtiene: tiempo mínimo (3) sinteriza bien, aunque en alguna zona puede hallarse alguna partícula de poco enlace (esto no llega a ser problema), casi no se descubre la división entre las capas; con tiempo medio (6) sinteriza bien y los enlaces son adecuados; para tiempo máximo (9) no se encuentran partículas sueltas y el enlace entre las capas es satisfactorio.

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

Como conclusión puede decirse que se aprecia una influencia directa más fuerte o determinante del tiempo en la calidad de la sinterización, siendo esta más satisfactoria cuando la permanencia en el horno es de 90 min. (o de 75 min. si la temperatura es mayor o igual a 740 °C). Cuando la temperatura es del orden de 740 °C o mayor, comienza a influir con mayor peso en la intensidad del proceso difusivo, obteniéndose mejor resultado cuanto mayor sea el tiempo de permanencia. En general, la temperatura de 700 °C y el tiempo de 60 min. resultan insuficiente para la difusión en el rango térmico de trabajo de los moldes.

Sobre la adherencia: los resultados de la prueba de adherencia se corresponden con los esperados según el comportamiento microestructural.

La corrida de mínimo tiempo y temperatura presentó fragmentos de capa levantada y formación de pequeñas grietas; para tiempo medio y temperatura mínima aparecieron grietas; en el nivel medio de temperatura y máximo tiempo surgió una pequeña grieta en la zona del orificio de lubricación (que es un concentrador de tensiones y además allí siempre la compactación es menor por no existir capa de respaldo). Las restantes pruebas de adherencia resultaron satisfactorias.

Sobre la porosidad: el nivel de porosidad es en general alto en todas las corridas, aunque su distribución es adecuada, excepto en los casos señalados anteriormente con cadenas de poros (corrida 1) o con partículas mal sinterizadas rodeadas de poros en magnitud importante.

Sobre la rugosidad superficial: de este ensayo puede concluirse que el cojinete de fábrica babbittizado presenta menor rugosidad (Ra 0.2) que el metal recuperado al salir del horno (Ra 1.8) y también con respecto al cojinete recuperado ya maquinado (Ra 0.4-0.5). Esto implica la necesidad de recalcular la holgura óptima de montaje y trabajo del par tribológico para emplear las piezas recuperadas, de no emplearse un maquinado más fino o un recubrimiento posterior sobre el bronce recuperado.

3.6.2. Ensayos de banco.

Como parte de este trabajo se realizan pruebas de banco a tres bombas NSH-50 reparadas (con laterales recuperados), en un banco de prueba en la Empresa Oleohidráulica de Cienfuegos.

Capítulo III. Conjunto de Soluciones para el Perfeccionamiento de la Tecnología.

Después de montada la bomba en el banco, se procedió según se estable para este tipo de equipamiento:

- 1- Procedimiento sin carga, periodo de asentamiento (3 min.).
- 2- Con carga, 20 Kgf/cm² (4 min.).
- 3- Con carga, 60 Kgf/cm² (4 min.).
- 4- Con carga, 80 Kgf/cm² (4 min.).
- 5- Con carga, 100 Kgf/cm² (3 min.).
- 6- Cuatro oscilaciones consecutivas de carga desde un mínimo de cero a 135 Kgf/cm².

Durante el funcionamiento de las bombas se determinó según la carga, el caudal y eficiencia del equipo, y estos parámetros se mantuvieron dentro de los rangos establecidos.

Este procedimiento se repitió varias veces con cada bomba, para establecer el comportamiento de las piezas recuperadas en esas condiciones.

Al término de la prueba se desmontaron las bombas para observar los laterales, estableciéndose que estas piezas no sufrieron alteraciones de sus dimensiones o forma y que conservaban su capacidad de trabajo.

Posteriormente se llevaron a una fase superior, explotación en Combinadas Cañeras del C.A.I “Elpidio Gómez” las que mantuvieron su capacidad de trabajo del circuito Hidráulico y llevaron a término la zafra, lo que avaló el trabajo como **prueba de campo**.

Capítulo IV. Análisis de Factibilidad Técnico Económico de la Tecnología.

Capítulo IV. Análisis de Factibilidad Técnico Económico de la Tecnología.

4.1. Generalidades del Cálculo Económico.

En el presente capítulo se realizará el estimado de los gastos en que se incurrió durante la investigación, en particular por concepto de construcción de las instalaciones experimentales, y se calculará el costo de recuperación y fabricación de los cojinetes de deslizamiento y el análisis de la factibilidad técnico económico de la introducción de la nueva tecnología “Pulvimetalurgia Dilatómetrica”.

Los gastos en la investigación están formados por el conjunto de recursos empleados en ella, como son: materias primas, energía, salario, seguridad social, desgaste de activos fijos tangibles, etc, expresados en términos monetarios.

Gastos en Materias primas y materiales.

Estos se refieren a los materiales e insumos empleados en la investigación y desarrollo a pequeña escala de la recuperación y/o fabricación de las piezas, cuyo valor resulta multiplicar el precio por unidad, por la cantidad de material utilizado.

$$G_m = \text{Precio unit} * \text{cant}$$

Gastos en Energía.

Para su determinación se multiplican la potencia consumida en (kw) por el tiempo de operación de cada equipo en (h) y por el precio de un kilowatt hora:

$$G_e = \text{Pot(kw)} * \text{tiempo (h)} * \text{Precio(P/kw*h)}$$

Gastos en salario.

Se asume el salario mensual de un obrero, promedio \$ 255 $\frac{P}{mes}$ y de ahí se establece una tarifa horaria, dividiéndolo entre las horas laborables mes. Además se calcula el salario complementario, que es el 9.09 % del salario devengado y esto se multiplica por el tiempo que dura cada actividad.

$$G_{sal} = \text{Salario(P/mes)} * \text{tiempo (h)} * 1.0909$$

Gastos de Seguridad Social.

Este se obtiene calculando el 14% del monto total del elemento salario.

Capítulo IV. Análisis de Factibilidad Técnico Económico de la Tecnología.

Amortización.

Una vez conocido el valor total neto del equipamiento instalado se le aplica la tasa fija de amortización que establece el SNC. La multiplicación por un tiempo dado ofrece el valor de amortización para el período.

$$\text{Gamort} = \text{Valor (P)} \cdot 10\% \cdot \text{tiempo (h)}$$

Gastos Indirectos.

Para cuantificar los gastos indirectos de producción se asume un 15% de los gastos directos, ya que estos se deben a actividades que apoyan el proceso productivo y como se trata de un trabajo de laboratorio no inciden de manera tan significativa.

4.2. Análisis de factibilidad técnico económico.

Después de calcular todos los gastos que se incurren en el proceso de investigación y considerando la introducción de la tecnología “Pulvimetalurgia Dilatométrica”, se elaboró el análisis económico y financiero.

Considerando que este proceso duraría 5 años, con la producción anual, ver anexo IV, tabla 4.1 y con el presupuesto, ver anexo IV, tabla 4.2, se calculó el flujo de caja, ver anexo IV, tabla 4.3, obteniéndose el Valor actual Neto (VAN) que representa la ganancia que se va a obtener a lo largo de su vida útil $\text{VAN} = \$154.899 \text{ MP}$.

$$\text{VAN} = \sum \left(Fc_{sd} \cdot \frac{1}{(1 + Td)^n} \right)$$

Donde $n = 5$ años.

$R = 20\%$ Tasa de rentabilidad para las inversiones.

I_o = Inversión Inicial. Es el período o etapa de I+D y de inversión, en este caso está comprendido en 1 año y la suma de los costos de este periodo conforman la Inversión inicial.

Posteriormente se calcula la $\text{TIR} = 136.7\%$ utilizando el programa Excel, esta se define como el tipo de descuento al cual el VAN de una investigación sería igual a cero. La investigación es aceptada puesto que el costo de oportunidad del capital (20%) es menor que la TIR, siempre que esto ocurra el VAN es mayor que cero.

El cálculo del período de recuperación de la inversión se apoya en el método del período de recuperación descontado que no es más que el número de años que se requieren para recuperar una inversión a partir de los flujos netos de efectivo descontados.

Capítulo IV. Análisis de Factibilidad Técnico Económico de la Tecnología.

$$\text{Período de Recuperación} = \text{Año anterior a la Recuperación} + \frac{\text{Costo no recuperado al principio del año}}{\text{Flujo de efectivo durante el año}}$$

El período de recuperación de la Inversión es de 0.7 años y esto es favorable pues en los primeros meses que se comienza la producción se recupera la inversión inicial, además este método indica el grado de riesgo de la investigación, puesto que los flujos de efectivo que se esperan en el futuro son más riesgosos que los flujos de efectivo a corto plazo.

El índice de rentabilidad o Ratio Costo Beneficio es el valor actual de los flujos de efectivo previsto dividido por la inversión inicial.

$$IR = \frac{V.A.N}{I_o}$$

$$IR = 5.31$$

El índice de rentabilidad es 5.31, esto indica que el VAN es positivo, o sea, que la investigación va a tener ganancia durante toda su vida útil y que por cada peso de inversión se va a obtener \$5.31 pesos.

4.3. Análisis de sensibilidad.

El análisis de sensibilidad se apoya en los siguientes supuestos:

Variación o disminución de los precios en un 30 %, al disminuir los precios en un 30 % disminuyen los ingresos, se calcula nuevamente el flujo de caja y se obtiene: VAN = 84.888 MP, TIR = 84.9 % y el periodo de recuperación 0.95 años, por lo que el proyecto es aceptable, ver anexo IV, tabla 4.4.

Lo anteriormente expuesto demuestra que el proyecto de Introducción de la Tecnología “Pulvimetalurgia Dilatométrica”, es factible en los supuestos analizados ya que el periodo de recuperación es menor que un año, lo que posibilita recuperar la inversión sin arriesgarse a posibles cambios en el entorno económico actual, además que en ambos análisis el VAN es mayor que cero y con un índice de rentabilidad alto.

CONCLUSIONES

Una vez terminado el trabajo de investigación se llegó a una serie de conclusiones que avalan la calidad del trabajo y a la vez reafirman los conocimientos teóricos sobre la Pulvimetalurgia Dilatométrica.

1. Se obtiene un novedoso método para la recuperación y fabricación de piezas de repuestos (cojinetes de Deslizamientos Cilíndricos y Planos).
2. Se desarrolló la tecnología para la recuperación de cojinetes cilíndricos y planos base cobre.
3. Se desarrolló la tecnología de fabricación de cojinetes cilíndricos trimetálicos, colocando una interfase de Níquel químico en el substrato de acero.
4. Se desarrollaron un conjunto de soluciones como son:
 - Se logró planificar el experimento de optimización del proceso, definiendo los factores, la región de experimentación y el tipo de plan experimental, obteniéndose como parámetros óptimos una temperatura de 740 °C y tiempo de permanencia 75 minutos.
 - Se diseñó, construyó y empleo una instalación experimental para controlar la atmósfera de horno, con la cual se establece en la cámara una atmósfera controlada neutra (de nitrógeno), empleada en combinación con polvos desoxidados en la recuperación y fabricación de las piezas.
 - Se diseñó y construyó una instalación de impregnación en aceite, se muestra una tecnología para este proceso y se determina el tiempo óptimo (5 minutos) para impregnar las piezas a presión (P const.) y temperatura (T const.).
 - Se logra variar las propiedades mecánicas (dureza y rugosidad superficial) de las piezas sometidas a deformación plástica en frío mediante el bruñido por rodillado, con incrementos en la dureza superficial y en la calidad del acabado superficial, observándose que luego de deformarse la capa superficial aún se mantiene un determinado % de poros el cual garantiza la impregnación en aceite.

5. Se completó la construcción de una instalación experimental para la evaluación tribológica del par antifricción, evaluándose el desgaste de las piezas ensayadas, demostrándose que la resistencia al desgaste de los cojinetes recuperados por este nuevo método y autolubricados es muy superior a la resistencia al desgaste de los cojinetes de fábrica del motor KVD.
6. El análisis económico realizado permitió determinar adecuadamente los gastos de investigación y demuestra claramente la factibilidad técnico económico de la introducción de la tecnología de recuperación y/o fabricación de piezas por Pulvimetalurgia Dilatométrica, obteniéndose que el VAN es mayor que cero, con un índice de rentabilidad alto y un período de recuperación de la inversión menor que un año.
7. Por último se obtuvo una novedosa tecnología para la recuperación y/o fabricación de piezas por Pulvimetalurgia Dilatométrica validadas con pruebas de campo, nunca antes expuesta y patentada en la O.C.P.I.

RECOMENDACIONES

Las experiencias obtenidas en el presente trabajo investigativo permiten enunciar las siguientes recomendaciones:

1. Utilizar el principio de depósito de finas capas de un sustrato aprovechando la fuerza de dilatación lineal de los moldes para otros fines, en fabricación o recuperación de piezas bimetálicas.
2. Optimizar el diseño de los moldes en cuanto al volumen de los aceros inoxidables.
3. Introducir la nueva tecnología a escala industrial, su evaluación, puesta a punto, utilizando atmósfera reductora.

BIBLIOGRAFÍA

1982. *Análisis de Varianza.*, La Habana.: Editorial Ministerio de Educación Superior.
2005. Error Estimation Approaches for Progressive Response Surfaces. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.60.9734>.
2000. Response Surfaces for Optimal Weight of Cracked Composite Panels: Noise and Accuracy. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.6.9454>.
2005. The SAS® ADX Interface – Designing the Future. . <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.129.5832>.
- , 1.L.C.A., 1995. Cálculo Térmico del motor CMD-72. , p.75h.
- , 5.H., 1992. *Formerly Ninth Edition, Metals Handbook* ., 11(4), p.56-58p.
- , A.Y., 1975. *The Design of experiments to find optimal conditions.*, Moscú.: Editorial MIR.
- , A.I., 1984. *Elementos de Construcción y Cálculo de Motores de Combustión Interna.*, La Habana.: Editorial Pueblo y Educación.
- , A.D.R., 1998. *Ciencia e Ingeniería de los Materiales.* Tercera edición. ., México: International Thomson Editores S.A.
- , A.H., 1992. Failure Analysis and Prevention. <http://apuntes.rincondelvago.com/procesos-de-fabricacion.html>.
- , B.J.E., 1995. Recuperación de los laterales antifricción de la bomba hidráulica NSH-50 por pulvimetalurgia diletométrica. , p.80h.

- , B.B., 2005. Tools Private Limited, "Burnishing", India.
<http://www.brighthburnishingtools.com>.
- , C.G.M., Fundamentos de la Estadística. Teoría de los errores y planificación de los experimentos. En *Evaluación y prueba de los automóviles*. La Habana., p. 329 p.
- , C.A.M., 1976. Dilatación y Deformación. En *Propiedades mecánicas y térmicas de los materiales*. Barcelona.: Editorial Reverte., p. 41-43p.
- , C.M.J.L., 1987. *Diseños estadísticos para la obtención de información.*, La Habana.: Universidad de La Habana.
- , D.L.L., 2000. Cojinetes y rodamientos. <http://rodamientos.wordpress.com/>.
- , D.V., 1990. *Elementos de máquinas.*, La Habana.: Editora ENPES.
- , E.B.H., Caracterización Física y Metalográfica de fallas de Cojinetes 2007 Torres Rincón Y. <http://www.pucp.edu.pe/congreso/cibim8/pdf/12/12-04.pdf>.
- , F.M.C.D., Superficies de Respuesta. Métodos y Diseños.
http://bellman.ciencias.uniovi.es/d_experimentos/d_experimentos_archivos/sr.pdf.
- , G.E., 2002. Planificación de Experimentos en la Industria Química.
- , G.C.W., 1991. Diseño de Experimentos. En *Estadística*. La Habana.: Editorial Pueblo y Educación., p. 376p.
- , G.A.P., 1978. *Metalografía II*, Moscú.: Editorial MIR.

- , H.C., 1988. Investigations of the shell machining–burnish rolling process in deep-boring machines. *Industries Anzeige.*, 110(84), p.50-51p.
- , H.S., 2001. The road to smoother surfaces. *Manufacturing Engineering.*, 126(2), p.70-78p.
- , H.R., 2001. Puesta a punto de un dispositivo experimental para el rodado de superficies cilíndricas exteriores. , p.98h.
- , H.F., 1985. *Planificación de los experimentos.*, Centro Universitario de Pinar del Río.: Ediciones MES.
- , H.I.M., 2004. Tribology Friction and wear of Engineering materials.
- , J.M.S., 1973. *Motores de Automóvil.*, Moscú.: Editorial MIR.
- Juan J. Cabello., I.G.L.M., 1995. *Obtención de uniones bimetálicas por prensado en caliente de polvos de bronce sobre un respaldo metálico usando fuerzas dilatómetricas.*,
- , K.C.A., 1972. *Ciencia de Materiales para Ingeniería.* , Mexico.: Editorial Limusa-Wiley.
- , L.Q.J.A., 1993. Recuperación de cojinetes antifricción por pulvimetalurgia. , p.62h.
- , M.E.J., 1986. *Teoría y Práctica del rozamiento.*, La Habana.: Editorial ISPJAE.
- , M.G.D., 1985. *Materiales, polvo y piezas por pulvimetalurgia. Serie b.*, La Habana.: Editorial Centro de Investigaciones Metalúrgicas.
- , M.L., 2002. Diseño y análisis de experimentos.

- , O.L.G., 1987. *Fortalecimiento y acabado de las piezas mediante la deformación plástica superficial.*, Moscú.: Editorial Construcción de Maquinaria.
- , O.P., 1975. *Ingeniería de Diseño.*, Moscu.: Editorial MIR.
- , P.P.P.M., 2005. Empleo de superficies de respuesta para la solución de problemas de inventarios estocásticos. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lii/peregrina_p_pm/.
- , P.G.S., 1989. *Manual de Resistencia de Materiales.*, Moscú.: Editorial MIR.
- , R.E., 1995. *Friction and wear of materials.*, USA.: John Wiley.
- Raul Fuentes Gómez, F.G.R., 1995. Construcción de una máquina de ensayos tribológicos del tipo MFR-01. , p.70h.
- , R.D., 1985. *Elementos de Máquinas.*, La Habana.: Editorial Pueblo y Educación.
- , R.S., 1983. Análisis de la Varianza y su aplicación al Diseño de Experimento. En *Análisis Estadístico Aplicado*. Madrid.: Paraninfo., p. 411p.
- Silvia G. Fundora., M.W.F., 1991. Recubrimientos Protectores.
1982. *Análisis de Varianza.*, La Habana.: Editorial Ministerio de Educación Superior.
2005. Error Estimation Approaches for Progressive Response Surfaces. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.60.9734>.
2000. Response Surfaces for Optimal Weight of Cracked Composite Panels: Noise and Accuracy. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.6.9454>.
2005. The SAS® ADX Interface – Designing the Future. . <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.129.5832>.

, 1.L.C.A., 1995. Cálculo Térmico del motor CMD-72. , p.75h.

, 5.H., 1992. *Formerly Ninth Edition, Metals Handbook* ., 11(4), p.56-58p.

, A.Y., 1975. *The Design of experiments to find optimal conditions.*, Moscú.: Editorial MIR.

, A.I., 1984. *Elementos de Construcción y Cálculo de Motores de Combustión Interna.*, La Habana.: Editorial Pueblo y Educación.

, A.D.R., 1998. *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Tercera edición. ., México: International Thomson Editores S.A.

, A.H., 1992. Failure Analysis and Prevention.
<http://apuntes.rincondelvago.com/procesos-de-fabricacion.html>.

, B.J.E., 1995. Recuperación de los laterales antifricción de la bomba hidráulica NSH-50 por pulvimetalurgia diletométrica. , p.80h.

, B.B., 2005. Tools Private Limited, "Burnishing", India.
<http://www.brighburnishingtools.com>.

, C.G.M., Fundamentos de la Estadística. Teoría de los errores y planificación de los experimentos. En *Evaluación y prueba de los automóviles*. La Habana., p. 329 p.

, C.A.M., 1976. Dilatación y Deformación. En *Propiedades mecánicas y térmicas de los materiales*. Barcelona.: Editorial Reverte., p. 41-43p.

, C.M.J.L., 1987. *Diseños estadísticos para la obtención de información.*, La Habana.: Universidad de La Habana.

- , D.L.L., 2000. Cojinetes y rodamientos. <http://rodamientos.wordpress.com/>.
- , D.V., 1990. *Elementos de máquinas.*, La Habana.: Editora ENPES.
- , E.B.H., Caracterización Física y Metalográfica de fallas de Cojinetes 2007 Torres Rincón Y. <http://www.pucp.edu.pe/congreso/cibim8/pdf/12/12-04.pdf>.
- , F.M.C.D., Superficies de Respuesta. Métodos y Diseños. http://bellman.ciencias.uniovi.es/d_experimentos/d_experimentos_archivos/sr.pdf.
- , G.E., 2002. Planificación de Experimentos en la Industria Química.
- , G.C.W., 1991. Diseño de Experimentos. En *Estadística*. La Habana.: Editorial Pueblo y Educación., p. 376p.
- , G.A.P., 1978. *Metalografía II*, Moscú.: Editorial MIR.
- , H.C., 1988. Investigations of the shell machining–burnish rolling process in deep-boring machines. *Industries Anzeige.*, 110(84), p.50-51p.
- , H.S., 2001. The road to smoother surfaces. *Manufacturing Engineering.*, 126(2), p.70-78p.
- , H.R., 2001. Puesta a punto de un dispositivo experimental para el rodilado de superficies cilíndricas exteriores. , p.98h.
- , H.F., 1985. *Planificación de los experimentos.*, Centro Universitario de Pinar del Río.: Ediciones MES.
- , H.I.M., 2004. Tribology Friction and wear of Engineering materials.

, J.M.S., 1973. *Motores de Automóvil.*, Moscú.: Editorial MIR.

Juan J. Cabello., 1.G.L.M., 1995. *Obtención de uniones bimetálicas por prensado en caliente de polvos de bronce sobre un respaldo metálico usando fuerzas dilatómetricas.*,

, K.C.A., 1972. *Ciencia de Materiales para Ingeniería.* , Mexico.: Editorial Limusa-Wiley.

, L.Q.J.A., 1993. Recuperación de cojinetes antifricción por pulvimetalurgia. , p.62h.

, M.E.J., 1986. *Teoría y Práctica del rozamiento.*, La Habana.: Editorial ISPJAE.

, M.G.D., 1985. *Materiales, polvo y piezas por pulvimetalurgia. Serie b.*, La Habana.: Editorial Centro de Investigaciones Metalúrgicas.

, M.L., 2002. Diseño y análisis de experimentos.

, O.L.G., 1987. *Fortalecimiento y acabado de las piezas mediante la deformación plástica superficial.*, Moscú.: Editorial Construcción de Maquinaria.

, O.P., 1975. *Ingeniería de Diseño.*, Moscu.: Editorial MIR.

, P.P.P.M., 2005. Empleo de superficies de respuesta para la solución de problemas de inventarios estocásticos.
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lii/peregrina_p_pm/.

, P.G.S., 1989. *Manual de Resistencia de Materiales.*, Moscú.: Editorial MIR.

, R.E., 1995. *Friction and wear of materials.*, USA.: John Wiley.

Raul Fuentes Gómez, F.G.R., 1995. Construcción de una máquina de ensayos tribológicos del tipo MFR-01. , p.70h.

, R.D., 1985. *Elementos de Máquinas.*, La Habana.: Editorial Pueblo y Educación.

, R.S., 1983. Análisis de la Varianza y su aplicación al Diseño de Experimento. En *Análisis Estadístico Aplicado*. Madrid.: Paraninfo., p. 411p.

Silvia G. Fundora., M.W.F., 1991. Recubrimientos Protectores.

Tabla 1.1: Aleaciones cobre – plomo para cojinetes.

Aleación	Composición Química				Dureza Brinell HB	Lím. De Tracción $\frac{lb}{pg^2}$	Temp. máx. °C	Carga máx. $\frac{lb}{pg^2}$
	Cu	Sn	Pb	Zn				
Cobre - Plomo	65	-	35	-	25	8000	175	2000
Bronce al Estaño de alto % Pb.	70	5	25	-	48	25000	200+	3000+
Bronce semi-plástico.	78	6	16	-	55	30000	230	3000+
Bronce Plomoso rojo.	85	5	5	5	60	35000	230	3500
Bronce al Plomo	83	7	7	3	60	35000	230+	4000
Bronce Fosfórico.	80	10	10	-	63	35000	230+	4000

Tabla 1.2: Propiedades de los polvos 90/10 % de (Cu/Sn).

PROPIEDAD		BRONCE 90/10 % FORMA STANDAR				
		AR 212	AR 75	A 335	WR 10	W 212
Cu	%	89.5	89.5	89.5	90	90
Sn	%	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
Zn	%	0.5	0.5	0.5	-	-
H ₂ perdido	%	0.15	0.15	-	0.15	0.15
Fluidez	seg	30-33	30-35	35-45	30-33	35-40
Densidad aparente	$\frac{g}{cm^3}$	2.7	3.1	3.1	2.8	2.9

Tabla 1.3: Propiedades físicas de los metales para cojinetes.

Aleación	Densida $d \frac{g}{cm^3}$	Dureza HB	Lím. T. $\frac{lb}{p^2}$	M. Elast. $10 \frac{lb}{p^2}$	C. Dil. Term. $10^{-6} K^{-1}$
Babbitt al Estaño	7.4	25	11000	7.6	13.0
Babbitt al Plomo	10.1	21	10000	4.2	14.0
Aleación Cobre-Plomo	-	25	8000	-	-
Aleación Bronce al Plomo.	8.9	60	34000	14.0	9.9
Aleación Bronce al Estaño.	8.8	70	45000	16.0	10.0
Aleación de Aluminio.	2.9	40	22000	10.3	13.5
Aleación de Cadmio.	8.6	35	-	8.0	16.6
Aleación de Plata.	10.5	25	23000	11.0	10.9
Hierro Fundido	7.2	180	35000	23.0	5.7
Hierro sint. (prensado en frío)	6.1	50	25000	-	6.7
Bronce sint. (prensado en frío)	6.4	40	18000	-	10.5

Tabla 1.4: Características específicas de las aleaciones para cojinetes.

Aleación	HB mín del árbol	Compatibilidad	Conformabilidad y humectabilidad.	Resist. A la Corrosión.	Resistencia a la Fatiga
Babbitt al Estaño	150	E	E	E	P
Babbitt al Plomo	150	E	E	E	P
Cojinetes trimetálicos	230	E	B	B	B
Aleación Cobre Plomo.	300	E	E	P	E
Cobre Plomo babbitizado.	200	E	B	P	E
Bronce al Plomo	300	E	E	E	B
Bronce al Estaño.	300-400	P	P	B	E
Aleación de Al (6-7% Sn)	200-300	E	E	E	E
Aleación de Al 20% Sn)	200	B	E	E	E
Aleación de Cadmio.	200-250	E	B	P	E
Recubrimiento de Plata.	300-400	B	E	E	E

Notación empleada: Excelente (E), Buena (B), Pobre (P).

Tabla 2.1: Coeficientes de dilatación térmica de los aceros inoxidable utilizados en los moldes ($10^{-6} K^{-1}$).

Aceros	Temperatura °C							
	100	200	300	400	500	600	700	800
X18H10T	16	17	17.5	18	18	18.5	18.5	19
2X13	10.5	11	11.5	12	12	12.5	12.5	13

Tabla 2.2: Composición química de los aceros utilizados(%).

Aceros	Elementos componentes (%)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
X18H10T	0.08	0.8	2.0	0.035	0.025	17 - 19	0.3	9 - 11
2X13	0.16 - 0.2	0.8	0.8	0.035	0.025	12 - 14	0.3	0.6

Gráfico 3.1: Curva de Desgaste Gravimétrico en el Tiempo.

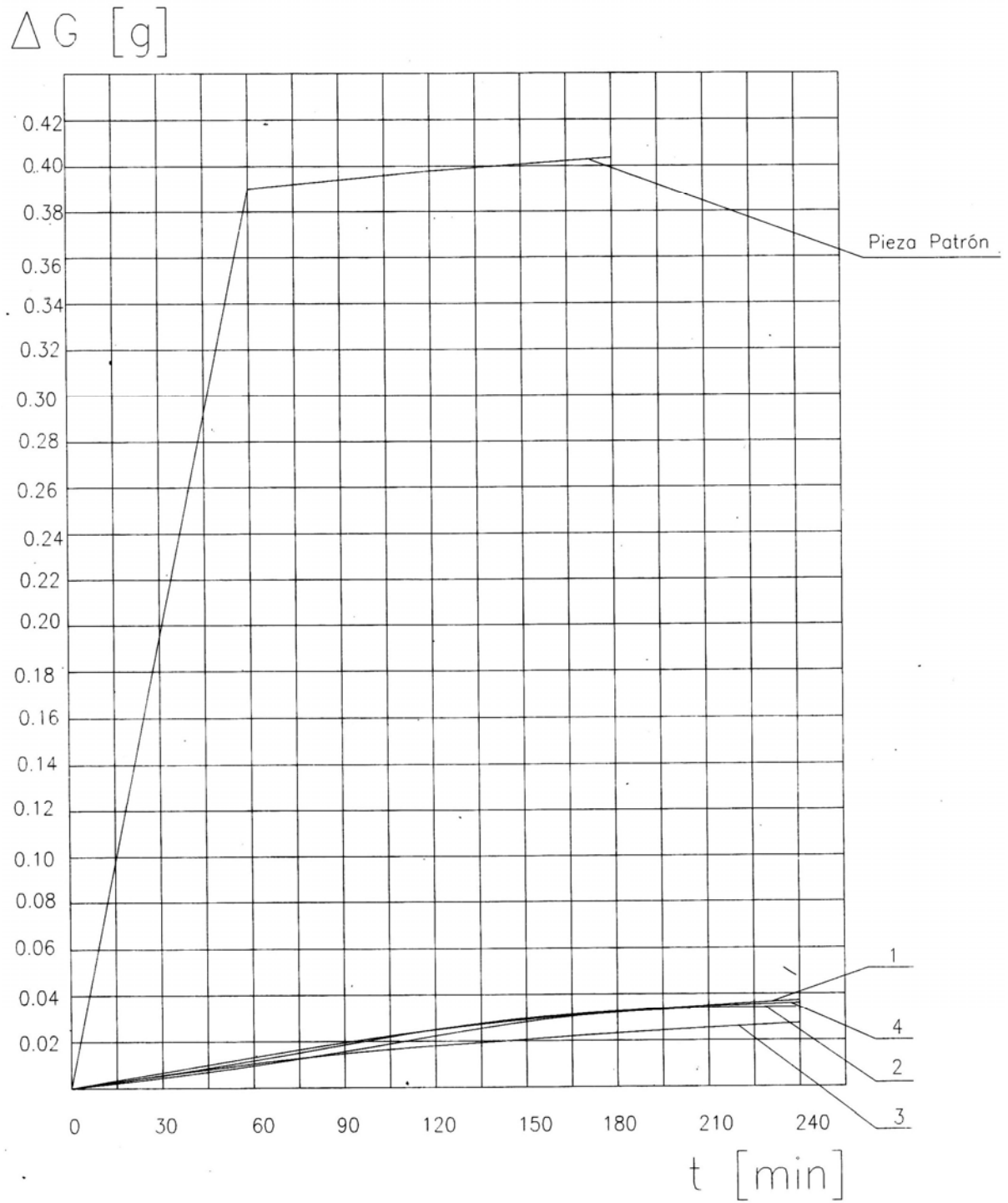


Gráfico 3.2: Difractograma del Análisis Químico.

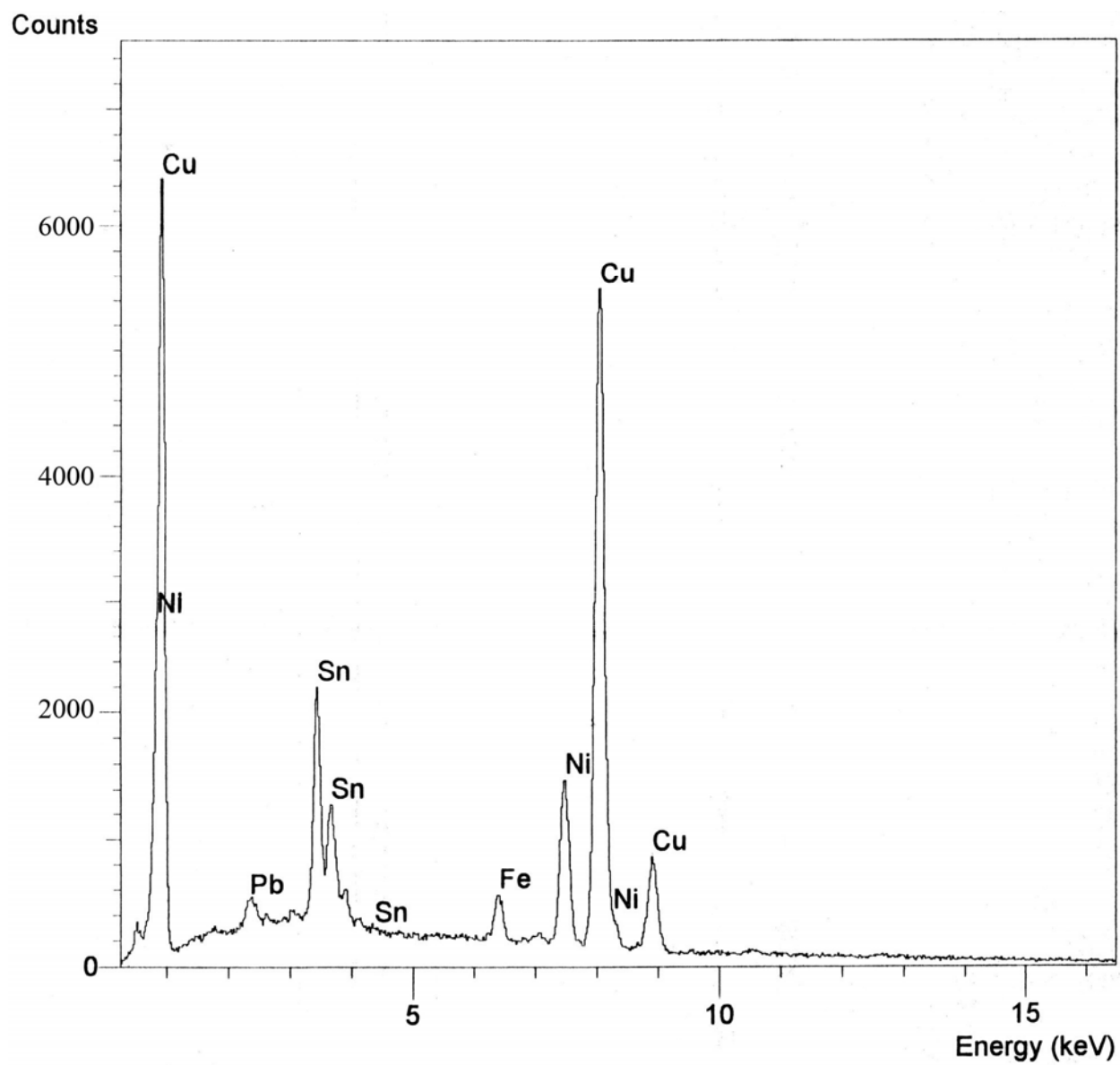


Gráfico 3.3: Difractograma del Análisis Químico.

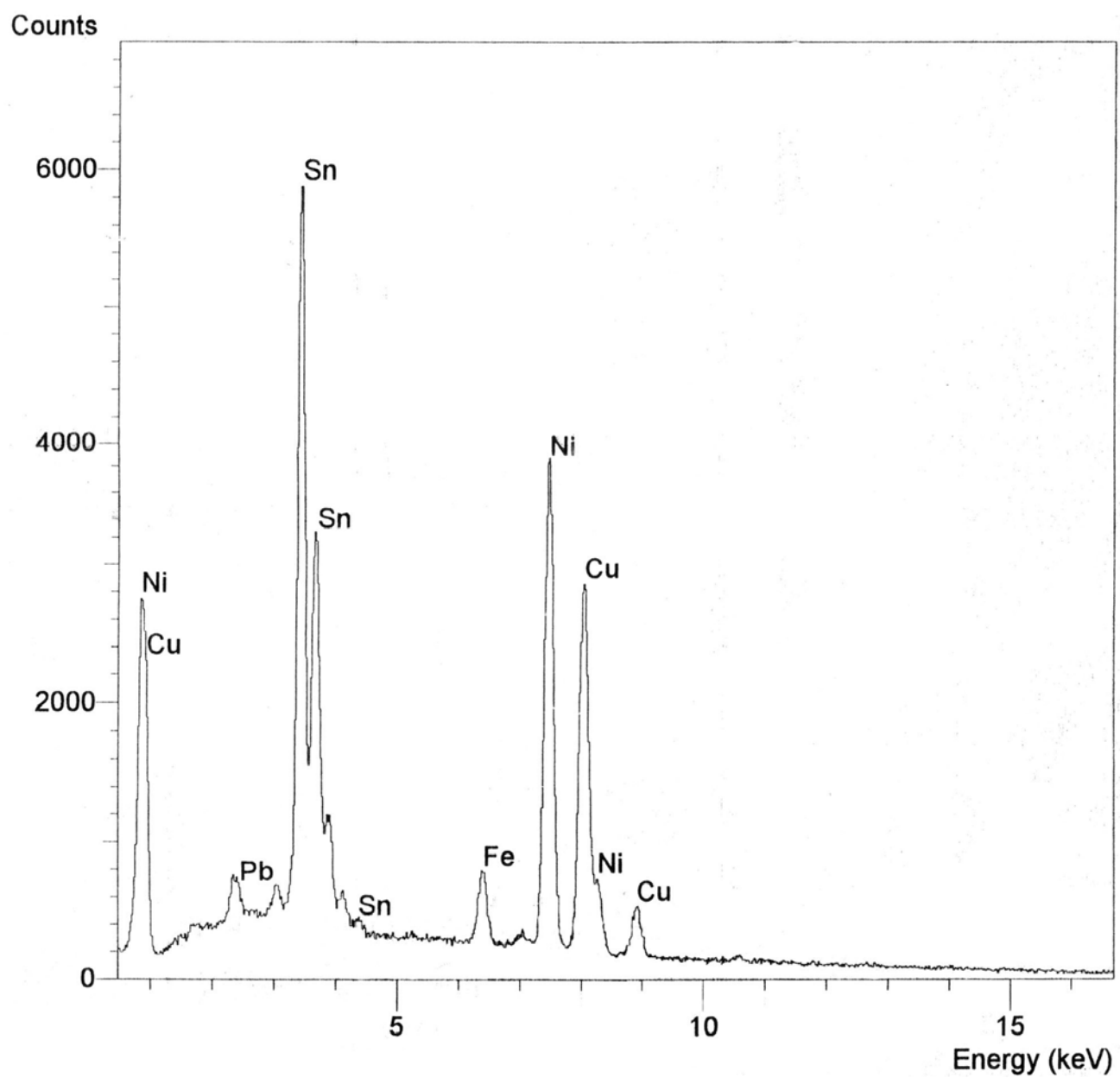


Gráfico 3.4: Difractograma del Análisis Químico.

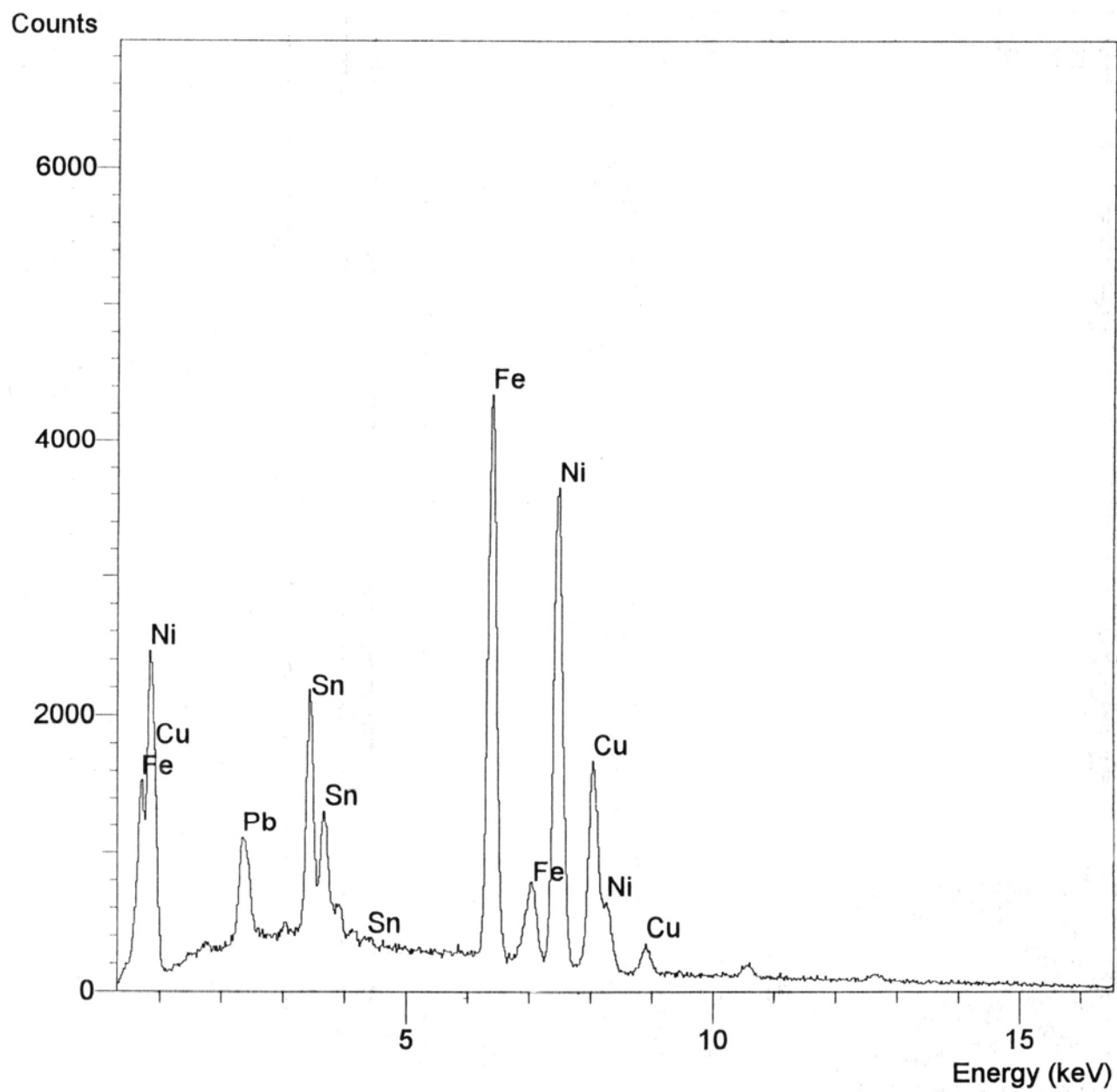


Gráfico 3.5: Curva que caracteriza la Saturación de las piezas durante el proceso de Impregnación en Aceite.

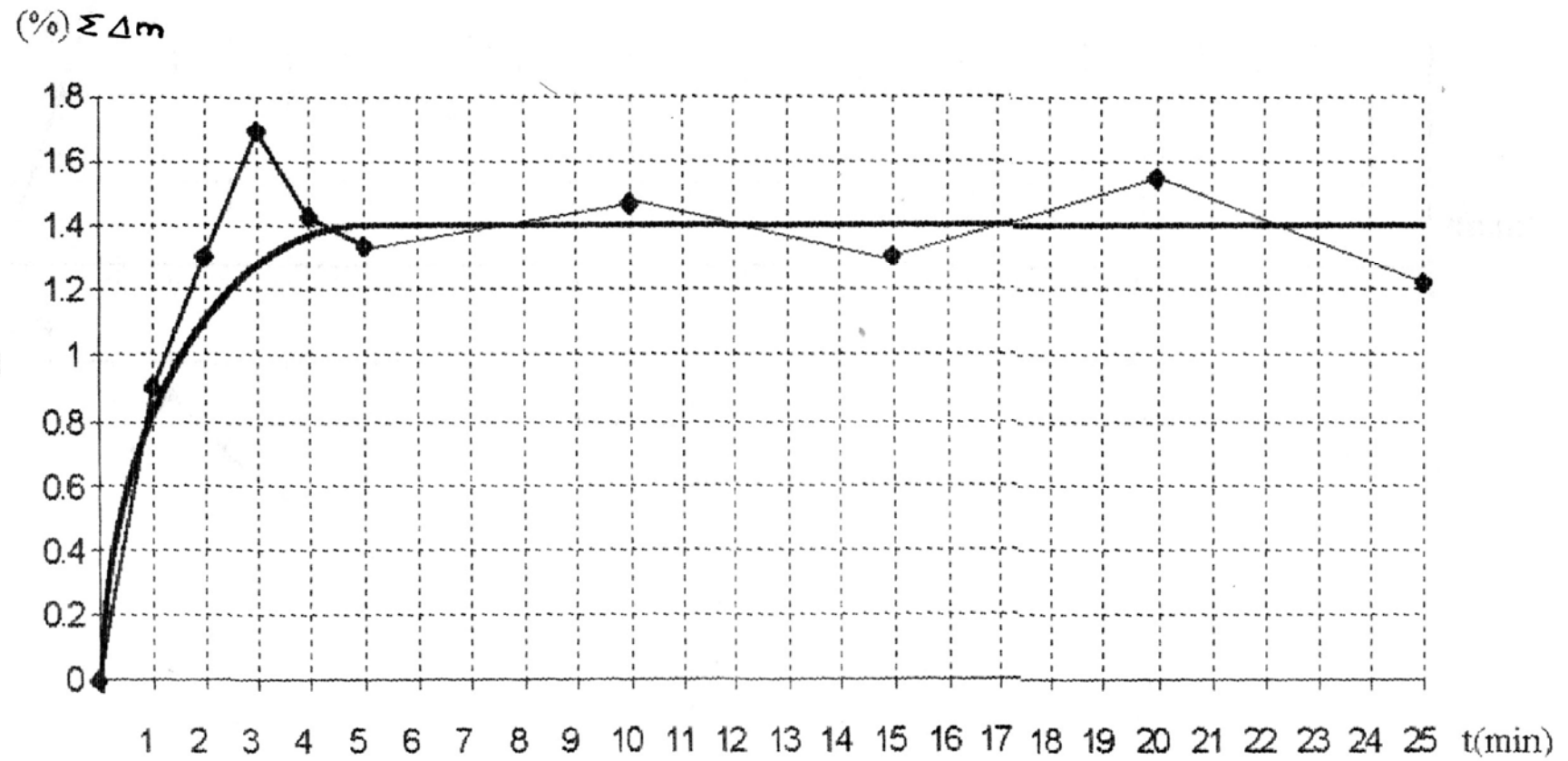


Tabla 4.1: Producción Anual.

Producción Anual			
Item	Cantidad por años (U)	Precio por Unidad (CUC)	Valor de la Producción anual (CUC)
Cojintetes planos Recuperados	1.000	14,00	14000,00
Cojintetes cilindricos Recuperados	3.000	14,00	42000,00
Cojintetes cilindricos Fabricados	3.000	20,00	60000,00
Total	7.000		116.000,00

Tabla 4.2: Presupuesto de Gastos

Item	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Total
Materias Primas	2,131	2,900	3,500	3,900	3,900	3,900	20,231
Equipos	12,900						12,900
Viajes y Dietas	1,950						1,950
Salario	6,400	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	31,400
Otros gastos	1,568	1,600	1,650	1,700	1,700	1,700	9,918
Energía Eléctrica	0,408	0,720	0,720	0,720	0,720	0,720	4,008
Total de Gastos Directos	25,357	10,220	10,870	11,320	11,320	11,320	80,407
Gastos Indirectos	3,804	1,533	1,631	1,698	1,698	1,698	12,061
Total del Presupuesto	29,161	11,753	12,501	13,018	13,018	13,018	92,468

Tabla 4.3: Análisis de Factibilidad Técnico-Económica de la Tecnología.

	Flujo de Caja				UM: MP	
Años de Duración del Proyecto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos		90,00	105,00	116,00	116,00	116,00
Materias Primas		2,900	3,500	3,900	3,900	3,900
Fuerza de Trabajo		5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Otros gastos		1,600	1,650	1,700	1,700	1,700
Gastos Indirectos		1,25	1,35	1,45	1,45	1,45
Depreciación		1,29	1,39	1,49	1,49	1,49
Gastos de distribución y Venta		0,60	0,70	0,80	0,80	0,80
Total de gastos		12,64	13,59	14,34	14,34	14,34
Utilidad neta en operaciones		77,36	91,41	101,66	101,66	101,66
Impuesto		27,08	31,99	35,58	35,58	35,58
Utilidad Neta		50,29	59,42	66,08	66,08	66,08
Flujo de Caja sin descontar		51,58	60,81	67,57	67,57	67,57
Tasa de descuento	1,0	0,833	0,694	0,579	0,483	0,402
Flujo de Caja Descontado		42,979	42,225	39,103	32,603	27,150
Costo de la Inversión	-29,161					
Flujo de Caja Descontado Acumulado VAN.	-29,161	13,818	56,043	95,146	127,749	154,899
Período de Recuperación (Años)	0,7 Años					
Tas Interna de Retorno TIR	136,70%					

Tabla 4.4: Análisis de Sensibilidad.

Flujo de Caja					UM: MP	
Años de Duración del Proyecto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos		67,20	73,50	81,20	81,20	81,20
Materias Primas		2,900	3,500	3,900	3,900	3,900
Fuerza de Trabajo		5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Otros gastos		1,600	1,650	1,700	1,700	1,700
Gastos Indirectos		1,25	1,35	1,45	1,45	1,45
Depreciación		1,29	1,39	1,49	1,49	1,49
Gastos de distribución y Venta		0,60	0,70	0,80	0,80	0,80
Total de gastos		12,64	13,59	14,34	14,34	14,34
Utilidad neta en operaciones		54,56	59,91	66,86	66,86	66,86
Impuesto		19,10	20,97	23,40	23,40	23,40
Utilidad Neta		35,47	38,94	43,46	43,46	43,46
Flujo de Caja sin descontar		36,76	40,33	44,95	44,95	44,95
Tasa de descuento	1,0	0,833	0,694	0,579	0,483	0,402
Flujo de Caja Descontado		30,629	28,007	26,013	21,689	18,061
Costo de la Inversión	-29,161					
Flujo de Caja Descontado Acumulado (VAN).	-29,161	1,468	29,475	55,488	77,177	95,238
Período de Recuperación (Años)	0,95 Años					
Tas Interna de Retorno (TIR).	84,90%					

