

**CINVESTAV
IPN
ADQUISICION
DE LIBROS**

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS

DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD QUERÉTARO

**CARACTERIZACIÓN DE PLATOS DE SN-SB CARGADOS CON DIAMANTE Y
ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE SU DESEMPEÑO EN EL PROCESO DE PULIDO
FINAL EN LA MANUFACTURA DE CABEZAS MAGNÉTICAS PARA DISCOS
DUROS**

TESIS QUE PRESENTA

EL C. INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA

CARLOS MANUEL HERNÁNDEZ RUIZ

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN LA ESPECIALIDAD DE MATERIALES



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y
DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL
INSTITUTO POLITÉCNICO
NACIONAL**

**COORDINACIÓN GENERAL DE
SERVICIOS BIBLIOGRÁFICOS**

DIRECTORES DE TESIS

DR. RAFAEL RAMÍREZ BON

DR. JUAN MUÑOZ SALDAÑA

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QRO.

JULIO, 2008

CLASIF.:	7A404.2 .A47 2008
ADQUIS.:	SSI-118
FECHA:	25/11/2009
PROCED.:	Don-2009
	\$ _____

ID: 158321-1001

Agradecimientos

A Dios que me guió durante la Maestría

A Rebeca, a mis Hijas, a mi Mamá y a mi familia por su amor, paciencia y respaldo, en especial a mi hija Sofía quien lleva por nombre lo adquirido en el tiempo de la Maestría.

A IBM por haber tenido la visión de iniciar una generación de Mexicanos más capacitados y a Hitachi por mantener esta convicción.

Al Cinvestav Querétaro por las facilidades otorgadas durante el transcurso de los cursos que comprendió la Maestría.

Al personal administrativo y de soporte del Cinvestav Querétaro por su disponibilidad y apoyo en todos los trámites, prácticas y análisis realizados durante el transcurso de la Maestría.

A los profesores del Cinvestav Querétaro por todo el tiempo otorgado durante las clases y sus viajes a Guadalajara, en especial

A los Dres. Rafael Ramírez Bon, Juan Muñoz Saldaña por la dirección de esta tesis y a los Dres. José Martín Yáñez Limón y Francisco Javier Espinoza Beltrán por sus comentarios enriquecedores a la misma.

A mis compañeros de clase por compartir sus conocimientos, sin duda me llevo algo de todos y cada uno de ellos.

Tabla de contenidos

Capitulo 1.	Introducción	1
Capitulo 2.	Objetivo	7
2.1	Objetivos Generales	7
2.2	Objetivos Particulares	7
Capitulo 3.	Antecedentes teóricos	8
3.1	Distribución estadística Weibull	8
3.2	Métodos de caracterización de polvos abrasivos	10
3.2.1	Composición, homogeneidad y contaminación	11
3.2.2	Dispersión y muestreo de polvos	11
3.2.3	Tamaño de partícula	12
3.3	Características metalúrgicas de las aleaciones Sn-Sb	15
3.4	Antecedentes del proceso de cargado de partículas abrasivas en platos de Sn-Sb 16	
3.5	Antecedentes del proceso de pulido	18
3.5.1	Procesos abrasivos	19
3.5.2	Abrasivos	20
3.5.3	Antecedentes del proceso de pulido de cabezas magnéticas	23
Capitulo 4.	Materiales y Métodos	25
4.1	Proceso de fabricación de platos de Sn-Sb	25

4.2	Caracterización de los platos de pulido	28
4.2.1	Composición química	28
4.2.2	Propiedades mecánicas	28
4.3	Proceso de cargado de partículas abrasivas en platos de Sn-Sb para el proceso de pulido de cabezas magnéticas	29
4.4	Características del medio de abrasión: Nanopartículas de diamante	31
4.4.1	Tamaño y distribución de tamaños de partícula	32
4.4.2	Morfología de las partículas abrasivas.....	32
4.4.3	Caracterización estructural de las partículas abrasivas.....	32
4.5	Medición de las partículas de diamante incrustado en el plato de pulido.....	32
4.6	Proceso de pulido de cabezas magnéticas de discos duros.....	33
Capítulo 5.	Resultados y discusión.....	37
5.1	Caracterización de platos de pulido de Sn-Sb	37
5.1.1	Composición química	37
5.1.2	Propiedades físicas.....	38
5.2	Análisis de tamaño y distribución de tamaño de partículas.....	39
5.3	Análisis de morfología de las partículas abrasivas	40
5.3.1	Partículas abrasivas aisladas	40
5.3.2	Partículas abrasivas incrustadas en el plato de pulido	41
5.4	Análisis de datos de desempeño con los parámetros de pulido laptime y lapuse	42

5.5	Ajuste exponencial de los datos del historial de desempeño experimental	43
5.6	Representación y análisis de los datos de desempeño en “acumulativos”	46
5.7	Distribución Weibull.....	46
5.8	Criterio alternativo para la identificación de platos buenos y platos malos: Máquinas de pulido como sistemas de monitoreo	48
5.9	Análisis estadístico a gran escala mediante distribución Weibull	49
5.9.1	Determinación de la unidad de proceso para la identificación de parámetros de desempeño.....	50
5.9.2	Determinación de los parámetros de desempeño de pulido relevantes para definir el desempeño de los platos	51
5.9.3	Determinación de tipo de población en los parámetros de desempeño	53
5.9.4	Comparación de poblaciones para distribuciones normales	54
5.9.5	Comparación de población en base a distribución Weibull.....	57
5.10	Evaluación de la distribución Weibull con los datos en gran volumen	60
5.10.1	Evaluación del parámetro phase1time para dos platos	60
5.10.2	Vida útil de los platos de pulido	65
5.10.3	Evaluación del modelo de vida para el parámetro phase1time en alto volumen de datos por tipo de cabeza magnética.....	66
Capitulo 6.	Conclusiones y perspectivas	70
6.1	Conclusiones	70
6.2	Perspectivas	72

Capítulo 7. Apéndices.....	74
7.1 Programas de SAS	74
7.2 Referencias.....	77

Lista de tablas

Tabla 1. Tipos de aleaciones de estaño en Platos de pulido	17
Tabla 2. Algunos parámetros de salida del proceso de pulido.....	34
Tabla 3. Variables principales del proceso de pulido	34
Tabla 4. Reporte de porcentaje de Antimonio	37
Tabla 5. Reporte de pruebas físicas a platos de Sn-Sb	38
Tabla 6. Valores estadísticos de la distribución de tamaño de partícula abrasiva	40
Tabla 7. Categoría de número de corridas por plato y su valor para el parámetro maxruns	50
Tabla 8. Fases de pulido y sus posibilidades de variación.....	52
Tabla 9. Evaluación de distribución normal y Weibull del parámetro <i>phase1time</i> de cada <i>plateid</i>	54
Tabla 10. Media aritmética de cada <i>plateid</i> y diferencias entre medias de platos.....	55
Tabla 11. Valores estadísticos para la variable <i>phase1time</i>	55
Tabla 12. Cálculo del poder de la prueba para comparación de medias del parámetro <i>phase1time</i>	56
Tabla 13. Valores estimados para los percentiles de la función Weibull del <i>phase1time</i> de los platos óptimos	57
Tabla 14. Parámetros estimados para la función Weibull para los platos óptimos	58
Tabla 15. Estimados de la función de distribución Weibull de cada <i>plateid</i> para un tiempo de vida de 216 segundos (Límites al 90% de confianza).....	60

Tabla 16. Estimados de la función de distribución Weibull de cada *maxruns* para un tiempo de vida de 216 segundos (Límites al 90% de confianza)..... 65

Tabla 17. Relación de platos retirados antes de la vida útil..... 65

Tabla 18. Relación de platos retirados del proceso de pulido en grupos de 15, 30, 45 y 60 corridas por plato 66

Tabla 19. Estimados de la función de distribución Weibull de los tipos de cabezas magnéticas A y B para las categorías 15 y 60 corridas para un tiempo de vida de 216 segundos (Límites al 90% de confianza) 69

Lista de figuras

Figura 1. Dimensiones de la cabeza magnética	1
Figura 2. Fotografía de una oblea	2
Figura 4. Etapa de cargado de partículas de diamante en el plato	4
Figura 5. Número de ciclos de pulido de dos platos	4
Figura 6. Densidad de probabilidad Weibull	9
Figura 7. Distribución acumulada Weibull.....	10
Figura 8. Diagrama de dispersión de luz dinámica.....	15
Figura 9. Diagrama de fases de la aleación Sn-Sb.....	16
Figura 10. Diagrama del proceso de fabricación de platos de Sn-Sb (Primera parte).....	26
Figura 11. Diagrama del proceso de fabricación de platos de Sn-Sb (Segunda parte).....	27
Figura 12. Diagrama a bloques del proceso de cargado de platos	30
Figura 13. Diagrama esquemático de la cinemática del proceso de pulido	34
Figura 14. Gráfica de la distribución de tamaño de la partícula abrasiva.....	39
Figura 15. Micrografía de las partículas abrasivas aisladas.....	41
Figura 16. Micrografía de aglomeración de partículas abrasivas en el plato de pulido	42
Figura 17. Gráficas representativas del desempeño de platos de pulido: <i>laptime</i> vs. <i>job number</i> (número consecutivo de proceso)	43
Figura 18. Comportamiento de desempeño de pulido de hileras del plato 50919 en términos de <i>phase2time</i> vs <i>plateuse</i>	44

Figura 19. Comportamiento de desempeño de pulido de hileras del plato 50919 en términos de *laprate* vs. *plateuse* 45

Figura 20. Comparación de distribución de datos Weibull de desempeño en términos de *maxruns* de dos platos de pulido. Cada punto en la gráfica representa el desempeño alcanzado por ciclo de preparación del plato..... 48

Figura 21. Comparativa de los dos parámetros de desempeño de platos más importantes: *RPP* vs. *initial laptime* 49

Figura 22. Gráfica comportamiento del parámetro *plateuse* en función del parámetro *phase1time* 51

Figura 23. Gráficas de variabilidad de los parámetros de desempeño: (a) *phase1time*, (b) *phase2time*, (c) *phase3time* y (d) *phase4time* en función de la unidad de proceso 53

Figura 24. Comparación de distribución Weibull para el parámetro *phase1time* entre un *plateid* de 15 corridas y un *plateid* de 60 corridas para el plato 1 61

Figura 25. Comparación de distribución Weibull para el parámetro *phase1time* entre un *plateid* de 15 corridas y un *plateid* de 60 corridas para el plato 2 62

Figura 26. Comparación de distribución Weibull para el parámetro *phase1time* para las categorías de plato 15, 30, 45 y 60 corridas..... 63

Figura 27. (a) Comparación de distribución Weibull para el parámetro *phase1time* para las categorías de plato 15 y 60 (b) Acercamiento a la zona del 99.9% de probabilidades 64

Figura 28. (a) Gráfica de la función de distribución del parámetro *phase1time*. (a) Tipo de cabeza magnética A. (b) Acercamiento para el tipo de cabeza magnética A 67

Figura 29. Gráfica de la función de distribución del parámetro *phase1time*. (a) Tipo de cabeza magnética B. (b) Acercamiento para el tipo de cabeza magnética B..... 68

Resumen

El trabajo que se presenta en esta tesis es el resultado de una investigación realizada para el proceso de pulido fino integrante del proceso de manufactura de cabezas magnéticas de discos duros en la planta de Hitachi Guadalajara. En este proceso de pulido, la eficiencia del vehículo de desbaste no puede ser determinado sino hasta que el plato es usado en la máquina de pulido, dicha eficiencia nos abre un horizonte para la investigación de la vida útil del plato de pulido en función de los parámetros y/o maquinaria del proceso de preparación de platos, el proceso de pulido o de los materiales utilizados en la manufactura de los platos de pulido. El presente trabajo tiene como objetivo el estudio y caracterización de los materiales que componen el plato de aleación Sb-Sn y del diamante utilizado como abrasivo para desbastar material cerámico AlTiC a escala nanométrica, así como el de establecer un procedimiento estadístico basado en datos de desempeño de los platos de pulido para predecir la vida útil de los mismos. Se determinó la morfología y distribución de tamaño de partícula del diamante utilizando Microscopía de Barrido Electrónico (SEM) y un analizador de distribución de tamaño de partícula respectivamente. La composición química de los platos fue medida por espectroscopía de absorción atómica. Los resultados muestran que ni la composición química ni el tamaño de partícula tienen diferencia significativa respecto a la especificación. Los resultados de las propiedades físicas de la aleación del plato de pulido mostraron diferencias significativas entre las muestras. Se determinó la diferencia entre un plato bueno y malo mediante un modelo exponencial basado en parámetros de desempeño. Respecto a los platos de óptimo y bajo rendimiento se encontró que sus parámetros de desempeño se ajustan a la distribución estadística normal y también a la weibull, y que utilizando 15 muestras para la comparación entre medias se tiene un poder estadístico de prueba bajo y para la comparación Weibull se tiene un poder estadístico aceptable. Se encuentra un modelo Weibull para la predicción del tiempo de vida de los platos de pulido en 216 segundos basado en el comportamiento de platos identificados como óptimos. Ese modelo se evalúa para cada tipo de cabeza magnética en particular y donde el modelo propuesto se ajusta al tipo de cabeza B y requiere de un número mayor de muestras o de modificar el valor estimado para tiempo de vida para el tipo de cabeza A. Finalmente se evalúa el modelo para datos a gran volumen para cada una

de las categorías en que fue dividida la cantidad de corridas por plato, encontrando el modelo capaz de comparar estadísticamente dichas categorías.

Abstract

The material presented in this thesis is the result of a research about a fine lapping process, which is part of the manufacturing process of magnetic heads for hard disks at Hitachi Guadalajara Plant. The efficiency of the lapping vehicle at the lapping process can not be determined until the lapping plate is used in the lapping machine, this efficiency opens a horizon for a research of lapping plate life based on process parameters and tools used for plate preparation, lapping process or raw materials used for plate alloy manufacturing. The objectives include the materials characterization that composes the plate of Sb-Sn alloy and the diamond used as abrasive to polish the ceramic material, AlTiC, at nanometric scale, to establish a statistical based on performance parameters data for lapping plate life prediction too. It was identified the morphology and particle size distribution of diamond by using a Scanning Electron Microscope (SEM) and a Particle Size Distribution Analyzer respectively. The chemical composition of plates was determined from atomic absorption spectroscopy. The results show that neither chemical composition nor particle size has significative differences between species. Plate alloy physical properties results found a difference between samples. An exponential model is determined in order to differentiate between good and bad plates based on performance parameters. Regarding parameters for optimum and low performance plates, they fit into normal and weibull distribution, if using a sample size of 15, media comparison has a low statistical power test, but for weibull comparison statistical power is good. A Weibull model is found to predict plate life at 216 seconds based on the behavior of optimal plates. This model is evaluated for each type of magnetic head, where model fits for type B and requires a significant increase of sample size or modifies plate life estimated value for magnetic head A. Finally the model is evaluated for high volume data at each plate life category and finding the model capable of statistically distinguish between these categories.

Capítulo 1. Introducción

La Planta de Hitachi Global Storage Technologies de México S.A. de C.V., (Hitachi-Guadalajara) ubicada en El Salto, Jalisco, produce cabezas magnéticas de lectura y escritura de discos duros. La planta ha sido líder mundial en la fabricación de este producto desde su fundación en 1997. Estas cabezas magnéticas consisten en pequeñísimas bobinas de materiales magnéticos como Fe, Ni, Co, o aleaciones como Fe-Co, Fe-Ni, etc, montados en un material cerámico como soporte.

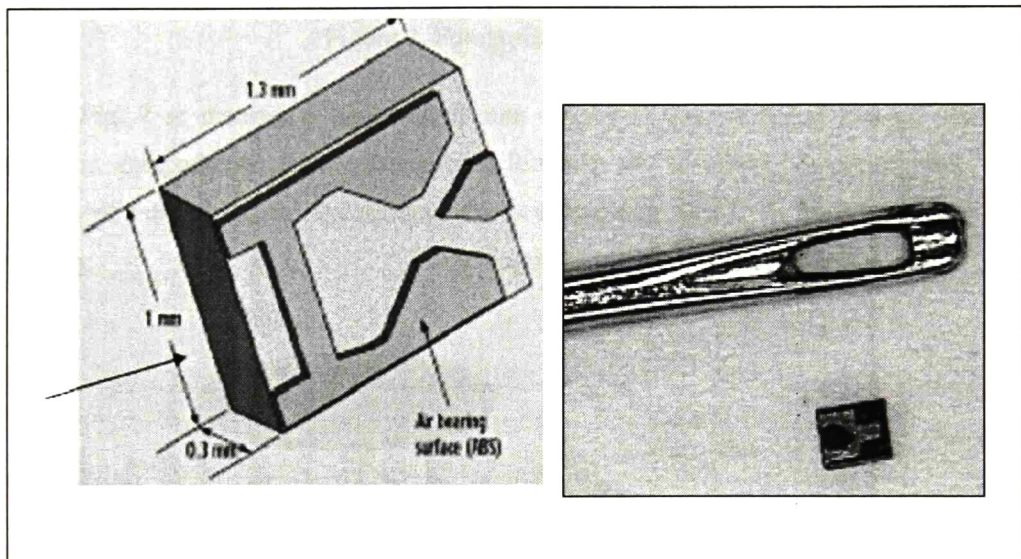


Figura 1. Dimensiones de la cabeza magnética

En la Fig. 1 se muestra el tamaño de una de estas cabezas magnéticas y su comparación con el hueco de una aguja de coser. Los elementos sensores son depositados en hileras o filas mediante técnicas de PVD y litografía en el material cerámico $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ (AlTiC) en forma de obleas de 5-6 pulgadas. Cada oblea contiene alrededor de 29400 cabezas magnéticas. También cada oblea se puede dividir en rectángulos y cada rectángulo se divide en hileras.

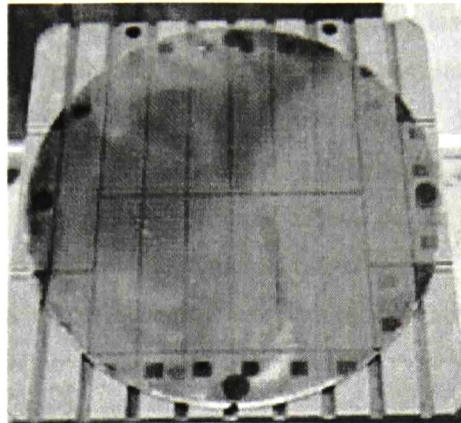


Figura 2. Fotografía de una oblea

En la Fig. 2 se muestra el esquema de una oblea conteniendo los elementos sensores impresos, agrupados en zonas rectangulares formadas por el mismo número de hileras. El proceso de fabricación de cabezas magnéticas consiste en separar de esta oblea cerámica, primero en rectángulos, después en

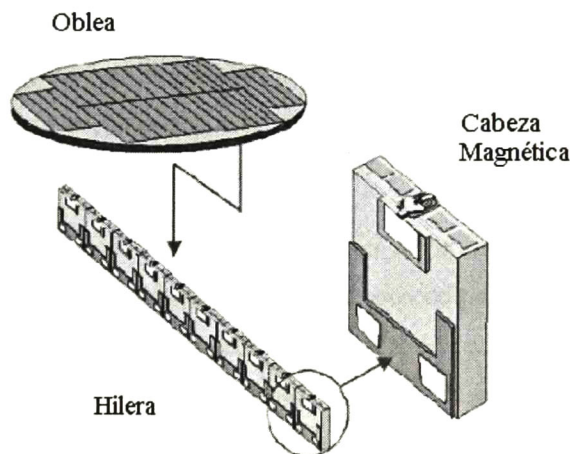


Figura 3. Proceso de Fabricación de cabezas magnéticas

hileras y finalmente en elementos individuales que conforman cada cabeza magnética. En la Fig. 3 se muestra el esquema de la fabricación de cabezas magnéticas. Lo anterior requiere más de 200 operaciones entre las que destacan operaciones de corte y de pulido

del material cerámico. Debido al tamaño del elemento sensor las operaciones de pulido del cerámico deben tener una precisión nanométrica que permitan un desbaste gradual y controlado en el mismo. Es un gran desafío en este proceso de manufactura el generar superficies que sean tanto planas como lisas. Las tolerancias de planicidad están en el rango de varias decenas de nanómetros a unos cientos de nanómetros por milímetro de longitud. Las tolerancias de rugosidad están en el rango de unos pocos nanómetros a miles de ángstroms. De aquí la importancia que tiene para la fabricación de cabezas magnéticas el contar con elementos abrasivos que satisfagan estos requerimientos de precisión nanométrica.

La industria electrónica y en particular la de cabezas de grabación utilizan cerámicos avanzados tales como la alúmina, carburo de silicio y AlTiC. La alta dureza de estos materiales hace al diamante el abrasivo óptimo para su maquinado. El pulido con abrasivo fijo, algunas veces llamado pulido nanométrico es un método común de maquinado usado en cerámicos. El pulido con abrasivo fijo es generalmente un proceso con dos cuerpos, con el grano de abrasivo fijo en un plato de pulido que produce una superficie extremadamente lisa debido al control de la profundidad de corte. El proceso de fabricación de un plato de pulido con abrasivo fijo es un proceso largo y algunas veces demandante. Los procesos actuales para fabricar un plato pueden requerir 2 horas o más, y usualmente la calidad del pulido del plato es desconocida hasta que es usado [Kam02].

Para llevar a cabo las operaciones de pulido en el proceso de manufactura de cabezas magnéticas Hitachi-Guadalajara cuenta con una área de preparación de sus propios platos de pulido. Este proceso que se describirá en detalle en la sección 4, consiste en incrustar partículas de diamante nanométrico en la superficie del plato de una aleación de Sn-Sb montados en un soporte de Al. En la Fig. 4 se muestra un plato en la última etapa del proceso de cargado con diamante. El proceso consta de varias etapas siendo una de las más importantes el cargado con partículas de diamante. En algunas de estas etapas se tienen establecidos procedimientos para el control de calidad de los platos de pulido, sin embargo, al final del proceso, cuando la superficie del plato ha sido cargado con diamante, no se cuenta con algún procedimiento que permita determinar que tan bien quedo incrustado el diamante en la superficie del plato ni en qué cantidad. Solo hasta que se envían los platos al

área de pulido se conoce con certeza su calidad basándose en los parámetros de su desempeño. Dada la gran cantidad de parámetros involucrados en el proceso de cargado de platos, ocurre con cierta frecuencia que la calidad del cargado de los platos de pulido es

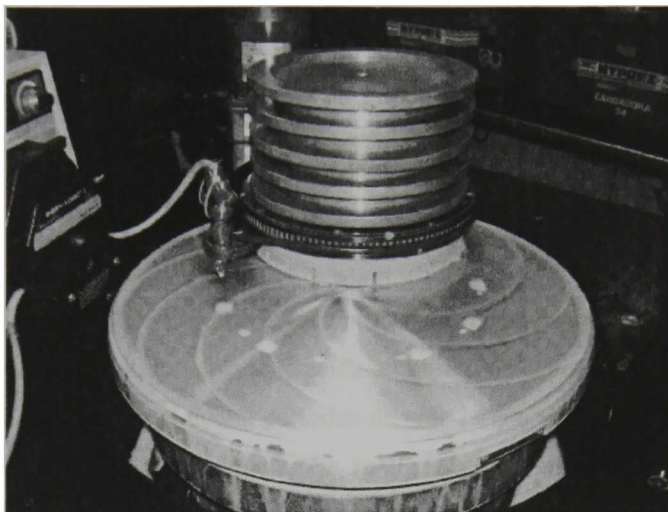


Figura 4. Etapa de cargado de partículas de diamante en el plato

deficiente lo que se refleja en su bajo desempeño. Adicionalmente, por razones no del todo conocidas, ocurren períodos de inestabilidad del proceso de cargado que se manifiesta por la gran variabilidad en el desempeño que tiene un mismo plato después de pasar por diferentes ciclos de cargado y pulido.

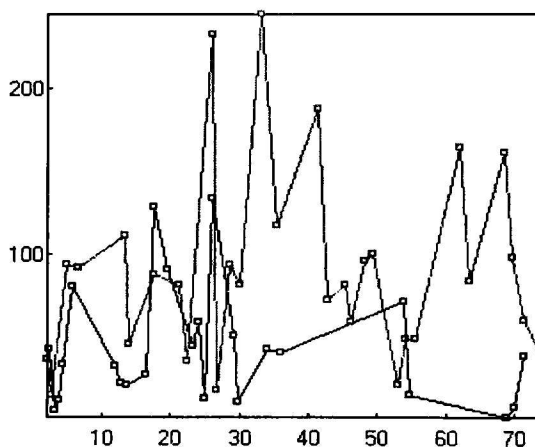


Figura 5. Número de ciclos de pulido de dos platos

En la Fig. 5 se muestra el número de ciclos de pulido de dos platos en un período de aproximadamente un mes. Se observa claramente en esta gráfica que el número de ciclos de pulido que desempeña cada plato después de cargarse es completamente aleatorio. Para estos dos platos en este período y en general se puede extrapolar para el resto de los platos, se tiene una gran dispersión en cuanto al desempeño de los mismos. Esta problemática de variabilidad en el desempeño de los platos de pulido también impacta en la calidad del pulido, que puede ser incluso más importante, porque repercute en la calidad de la cabeza magnética y puede dar lugar al rechazo de las cabezas magnéticas por daños producidos en esta etapa de manufactura.

El presente trabajo está enfocado en complementar estudios previos del proceso de cargado de diamante en platos de pulido en su aplicación en pulido de cabezas magnéticas. En este estudio se identifican platos que tienen períodos de vida largos y cortos, que son llamados también platos de *buen* y *mal* desempeño, se analizan los parámetros de desempeño del proceso de pulido buscando el parámetro que pueda diferenciar entre los platos “buenos” y “malos” y si pueden hacerlo solo tomando las primeras corridas del plato, que pueda ayudar a la predicción de la vida del plato. En los principales modelos de vida de productos en general, en especial de los cerámicos, encontramos a la distribución de población Weibull. Se hace uso de herramientas estadísticas, principalmente del programa informático *SAS (Statistical Analysis Software)* para el análisis de los parámetros de desempeño bajo la distribución Weibull. *SAS* es utilizado por el departamento de caracterización de cabezas magnéticas en el área de investigación y desarrollo de Hitachi Global Storage Systems de San Jose, CA, USA, y principalmente para el análisis de datos de alto volumen. *SAS* también es utilizado por compañías farmacéuticas para el análisis de los efectos de medicamentos.

Por el impacto que tiene la calidad de los platos de pulido en el proceso de manufactura de cabezas magnéticas y debido a la problemática descrita, Hitachi-Guadalajara ha dedicado esfuerzos para entender, mejorar y controlar el proceso de cargado de platos de pulido. Estos esfuerzos incluyen estudios exhaustivos mediante diferentes técnicas experimentales que incluyen diferentes tipos de microscopías y espectroscópicas del proceso de cargado con diamante. Adicionalmente se han realizado estudios para implementar técnicas de

cuantificación de diamante en platos que puedan emplearse in-situ para el control del proceso.

Capítulo 2. Objetivo

2.1 Objetivos Generales

Desarrollar un procedimiento estadístico para predecir la vida útil de platos de pulido mediante el análisis estadístico a gran escala de sus parámetros de desempeño durante las primeras etapas del proceso de pulido.

2.2 Objetivos Particulares

1. Determinar las principales propiedades de los platos de pulido y de las partículas abrasivas de diamante utilizados en el proceso de cargado de platos.
2. Determinar los parámetros de desempeño de pulido relevantes para definir la calidad de los platos.
3. Determinar la unidad de proceso que permita identificar la distribución estadística de los parámetros de desempeño.
4. Determinar el tipo de distribución estadística más apropiada para el análisis de los parámetros de desempeño a gran escala.
5. Desarrollar un modelo matemático dependiente de los parámetros de desempeño para determinar la calidad de platos de pulido durante las primeras etapas de su desempeño.

Capítulo 3. Antecedentes teóricos

Uno de los objetivos principales de este trabajo es el análisis estadístico de los parámetros de desempeño del proceso de pulido y la caracterización de los materiales que componen el plato de pulido y el diamante insertado en él. Para lograr este objetivo es necesaria la comprensión de la distribución estadística Weibull como modelo de vida de algunos productos. Respecto a las partículas abrasivas se requiere del entendimiento de los métodos de recolección, del análisis del tamaño de partícula y sus modos de dispersión de luz. Además en este capítulo se detalla la metalurgia de la aleación de los platos de pulido y algunos antecedentes del proceso de cargado de platos y del proceso de pulido de cabezas magnéticas.

3.1 Distribución estadística Weibull

La distribución Weibull es usada en una gran variedad de aplicaciones, especialmente como modelo para la vida de un producto. Esta distribución también se utiliza en el análisis de fuerza de ciertos materiales. Fue nombrada después que Wallodi Weibull [Wei51] popularizó su uso entre los ingenieros. Una razón para su popularidad es su gran variedad de formas. Esta característica la hace flexible al ajustarse a diferentes tipos de datos.

El método de análisis Weibull está basado en el tipo de producto del “eslabón más débil”. En otras palabras, si un producto consiste de muchas partes, cada una con un tiempo de defecto de la misma distribución y si el producto falla con el defecto en la primera parte, entonces la distribución Weibull puede ser conveniente para dichos productos. Por ejemplo, la vida de un capacitor puede ser determinada por la parte más débil que es el dieléctrico en él.

En el caso del dieléctrico, la función de la densidad de población Weibull es (1).

$$f(y) = \left(\frac{\beta}{\alpha^\beta}\right) y^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{y}{\alpha}\right)^\beta\right], y > 0 \quad (1)$$

En (1) el parámetro β es llamado forma y es positivo. El parámetro α es llamado escala y también es positivo; α es llamado “vida característica”, ya que es siempre el 100X $(1-e^{-1})=63.2$ percentil. α y y tienen las mismas unidades, por ejemplo, horas, meses, ciclos, etc. β es un número puramente sin dimensión. La Fig. 6 muestra los parámetros α y β que determinan la dispersión y la forma de la densidad de probabilidad Weibull respectivamente. La distribución es definida solo para valores positivos de y . De esta manera la distribución Weibull es conveniente como distribución de la vida de un producto [Nel03].

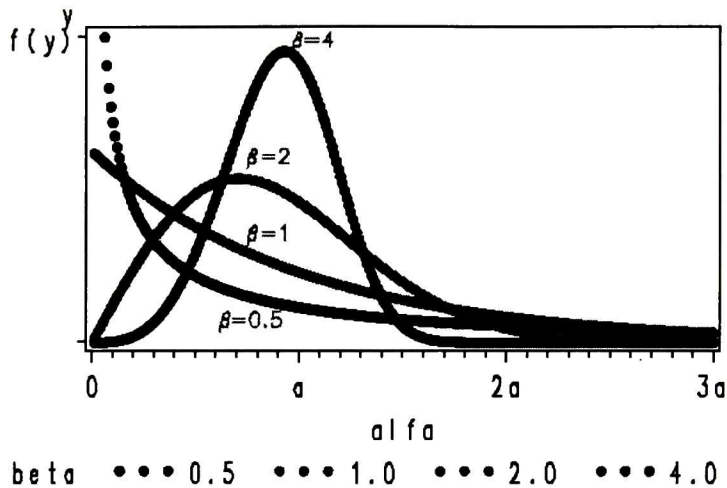


Figura 6. Densidad de probabilidad Weibull

Para el caso donde $\beta=1$, la distribución Weibull es una simple distribución exponencial. En este caso se utilizaba como distribución de vida de producto, aunque posteriormente se encontró que era inadecuada para muchos productos, ya que no se ajustaba al modelo exponencial. La distribución Weibull es la más flexible y ampliamente usada, en parte, porque incluye la familiar distribución exponencial.

En el caso de los valores de β entre 3 y 4, la distribución Weibull es similar a la distribución normal, que es generalmente la más usada entre las distribuciones de datos.

En la Fig. 7 se observan algunos valores de β en la función de la distribución acumulada Weibull, donde destaca la línea $\beta=1$ y la línea en $\beta=4$ similares a la función de distribución exponencial y a la función de distribución normal respectivamente.

La función para la distribución acumulada Weibull se escribe como (2).

$$F(y) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{y}{\alpha}\right)^\beta\right], y > 0 \tag{2}$$

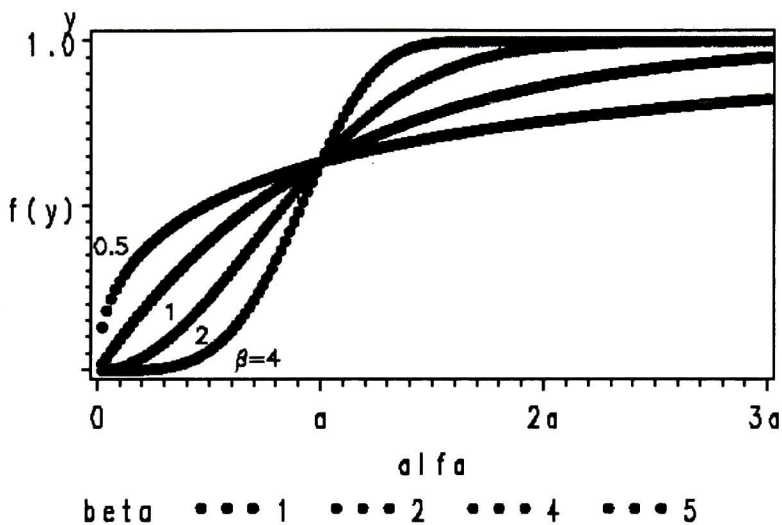


Figura 7. Distribución acumulada Weibull

3.2 Métodos de caracterización de polvos abrasivos

Todo proceso de polvos comienza con un polvo, por lo tanto, se debe entender la naturaleza del polvo para entender el proceso. Una partícula es definida como la unidad más pequeña de un polvo que no puede ser a su vez dividida. Generalmente, la metalurgia de polvos trabaja con partículas más grandes que el humo (0.01 a 1 μm), pero más pequeñas que la arena (0.1 a 3 mm). La mayoría de los polvos metálicos son similares en tamaño al diámetro del cabello humano (25 a 200 μm). El microscopio de barrido electrónico (SEM) es uno de los mejores equipos disponibles para la observación de las características discretas de los polvos.

Algunas características más allá de la apariencia de la partícula requieren de datos cuantitativos incluyendo los siguientes:

- ✓ Tamaño de partícula y su distribución
- ✓ Forma de la partícula y su variación con el tamaño de partícula
- ✓ Área de superficie
- ✓ Fricción entre las partículas
- ✓ Flujo y empaque
- ✓ Estructura interna de la partícula

3.2.1 Composición, homogeneidad y contaminación

Para especificar por completo la naturaleza del polvo se hace necesario describir cualitativamente su fabricación. Cuando se trabaja con polvos, no solo las propiedades individuales y a granel son importantes, sino también el lote del polvo. Las propiedades individuales de una partícula incluyen tamaño, forma, química, micro estructura, densidad y dureza. Para el polvo a granel, la caracterización implica la medición de las siguientes propiedades: empaque, flujo y atributos de la superficie. Se puede considerar describir una partícula como redondeada pero con forma irregular, sin embargo, tal información tiene valor limitado. Por otro lado, dimensionar la partícula es algo difícil debido a la forma. La amplia diferenciación en la determinación del tamaño es posible dependiendo del parámetro de tamaño y forma usados. La forma es una propiedad difícil de medir. Usualmente se asume que la simplificación de la forma es necesaria para reducir la información del tamaño a un simple parámetro.

3.2.2 Dispersión y muestreo de polvos

La colección o recolección de una muestra representativa de polvo para un análisis puede ser difícil. Considerando la producción típica, el tamaño de un lote puede ser de varias toneladas; una muestra de un lote será probablemente del orden de kilogramos. La mayoría de los instrumentos analíticos modernos requieren un tamaño de muestra de un

gramo o menos. Asumiendo una forma esférica, la población en un gramo depende del tamaño y la densidad del material (densidad teórica).

Los errores en el muestreo pueden ser evitados usando reglas simples. Las muestras de polvo deben ser tomadas de una corriente en movimiento, no de lotes almacenados. El mayor problema se presenta si la muestra es tomada después del envío o después de experimentar otras formas de vibración. En tales casos, es importante mezclar el lote de polvo antes de tomar la muestra para que los efectos de asentamiento sean minimizados. La muestra debe ser tomada en diferentes puntos. Los errores de muestreo se minimizan con el uso de un rifle rotativo, el cual divide el flujo del polvo en contenedores rotativos. Si es necesario tomar una muestra estática, entonces se deben tomar varias muestras de sitios aleatorios. Sin importar el método usado, es necesario criticar los posibles errores de muestreo y su efecto en el sesgo en la medición de las características del polvo. Para esta tarea los divisores que toman múltiples muestras aleatorias son de mucha utilidad. Cuando una mezcla de varios especímenes pequeños es tomada de una corriente de polvo en movimiento, tal como una banda transportadora, la calidad en el muestreo es alta.

La mayoría de las partículas son cohesivas se deben a sus pequeños tamaños. Debido a esto no se dispersan fácilmente. Aunque las fuerzas de van der Waals son pequeñas, la humedad absorbida causa la aglomeración de las partículas. Una aglomeración está definida como un racimo de partículas manteniéndose juntas por fuerzas muy débiles que pueden ser superadas por un estrés mucho más bajo que la fuerza intrínseca del material. Un ejemplo de una aglomeración es el lodo seco, que puede ser desmenuzado con poco estrés. En cambio, un agregado no puede ser dispersado fácilmente ya que los racimos de partículas se mantienen juntas por fuertes enlaces, tales como agentes cementantes. El problema está en la dispersión de partículas aglomeradas.

3.2.3 Tamaño de partícula

El tamaño de partícula es la determinación de las dimensiones de una partícula. El tamaño de una partícula depende de la técnica de medición, el parámetro específico a medir y la forma de la partícula. La mayoría de los analizadores de tamaño de partícula usan un parámetro geométrico y suponen una forma de partícula esférica. La base para el análisis

puede ser cualquiera de los valores geométricos obvios, como el área de la superficie, el área proyectada, la dimensión máxima, el área transversal mínima o el volumen. El tamaño de la partícula es probablemente una de las más importantes características de los polvos. Los datos de tamaño de partícula usualmente están presentados en base a la medición y de la supuesta forma de la partícula [Ger84].

3.2.3.1 *Analizador de distribución de tamaño de partícula*

Los analizadores de distribución de tamaño de partículas determinan tanto el tamaño de partículas y su distribución, y son usados para el control de producción de polvos en el campo de la cerámica, química y alimentos. Algunos analizadores ofrecen el formato de la prueba como un reporte de control de calidad: incluyendo ISO9000 y los estándares de manufactura de productos medicinales. En adición al análisis de tamaño de partículas menores a 0.1 micras, comúnmente manejadas por los analizadores de distribución de tamaño de partícula, también son capaces de medir partículas de hasta 2 mm en diámetro, el doble del tamaño máximo convencional.

Existen dos técnicas para el análisis de distribución de tamaño de partícula: dispersión de luz estática y dinámica [Ter05].

3.2.3.1.1. *Modo de dispersión de luz estática*

También conocida como dispersión de luz de ángulo bajo (LALS), difracción Fraunhofer o difracción Mie.

La difracción Fraunhofer es el método más simple de determinación de tamaño de partícula en las mediciones de dispersión de luz. Este se aplica para partículas más grandes a una micra.

En la medición de partículas más grandes que la longitud de onda de la luz, la luz difracta en un borde de la partícula a un ángulo determinado, el cual depende del tamaño de la partícula. Las partículas más grandes difractan la luz en ángulos relativamente más pequeños que las partículas pequeñas. De esta manera la observación de la intensidad de

luz difractada en los diferentes ángulos, determina la cantidad relativa de los diferentes tamaños de partículas de la muestra.

Cuando las partículas se acercan entre si o son más pequeñas que la longitud de onda de la luz, esta luz es difractada con mayor intensidad, en ángulos mayores y retro-difractada. La teoría de difracción Mie toma en cuenta este comportamiento y requiere que agreguemos información relacionada con las propiedades ópticas de las partículas, tales como el índice de refracción. Para las mediciones de tamaño de partícula, la intensidad de la luz debe ser medida en un rango angular completo. Cuando la partícula es más grande que la longitud de onda de la luz incidente, la ecuación Mie se reduce a la ecuación Fraunhofer. Esto permite el uso de un solo algoritmo para cubrir el rango completo de tamaños.

3.2.3.1.2. Modo de dispersión de luz dinámica

También conocida como espectroscopía de correlación de fotones (o *Photon Correlation Spectroscopy* o por sus siglas en ingles *PCS*). Es un término general para la medición de pequeñas partículas (menores que unas pocas micras) mediante la observación de cambio doppler de la luz incidente debido al movimiento Browniano de las partículas suspendidas. Este movimiento aleatorio de las partículas es causado por las moléculas del fluido chocando las partículas. Las partículas pequeñas son más rápidas que las partículas grandes debido a su baja inercia. Cuando una fuente de luz brilla en estas partículas, la frecuencia cambia debido a que las partículas están en movimiento (cambio doppler). La velocidad de las partículas determina el cambio en la frecuencia.

Al conocer la frecuencia de la luz incidente y medir la frecuencia de la luz dispersada se determina el retraso y se calcula el tamaño de partícula. Algunos analizadores que usan el método *PCS*, posicionan el detector a 90 grados de la luz incidente. Esto requiere una suspensión muy diluida para prevenir difracción múltiple y sobre-atenuación del rayo de luz. También requiere de un láser muy potente y la medición es sensible a la contaminación de polvo en el fluido.

Recientes instrumentos de medición posicionan el detector en o cerca de 180 grados de la luz incidente. Esto permite la medición de suspensiones con altas concentraciones, eliminando la necesidad de diluir la muestra y su contaminación por polvos.

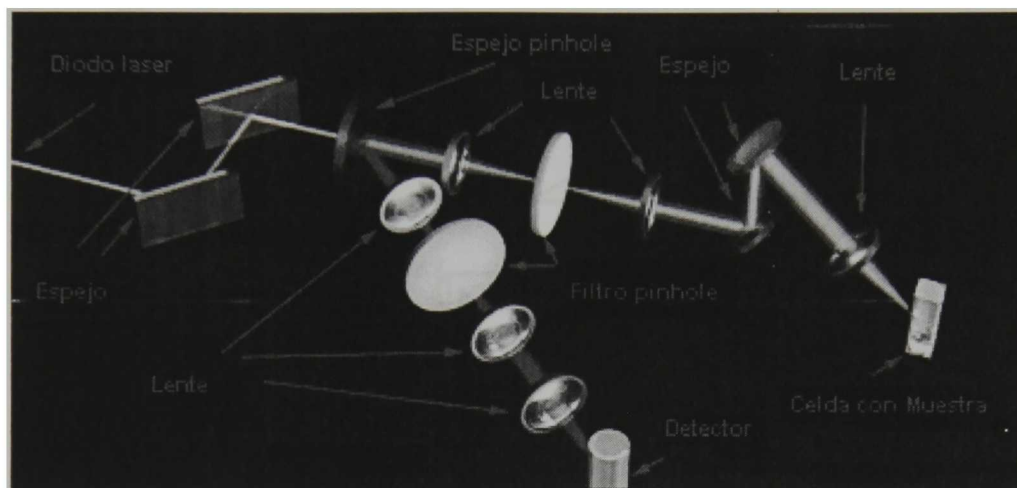


Figura 8. Diagrama de dispersión de luz dinámica

En la Fig. 8 se muestra el detector a 180 grados de la luz incidente permitiendo la medición de muestras de hasta 20% (en peso) de sólidos. El algoritmo usado para determinar el tamaño de partícula en la señal de la luz, incorpora el espectro de la transformada de fourier y la reconvulsión iterativa de la contribución relativa de varios tamaños de partículas en la mezcla. Esto permite la cuenta exacta de la media del tamaño, la forma de la distribución o de múltiples modas si estuvieran presentes.

3.3 Características metalúrgicas de las aleaciones Sn-Sb

Las características metalúrgicas de las aleaciones Sn-Sb pueden ser determinadas en base al peso en porcentaje atómico de cada elemento de la aleación de acuerdo con el diagrama de fases de la Fig. 9. Por ejemplo para el caso de la aleación de los platos de pulido con 2.5% de porcentaje de peso en atómico de antimonio en el proceso de fundición a 300°C, la aleación se presenta en una forma liquida. Para una temperatura de 22°C (temperatura de los cuartos limpios), la aleación es sólida en la forma SnSb.

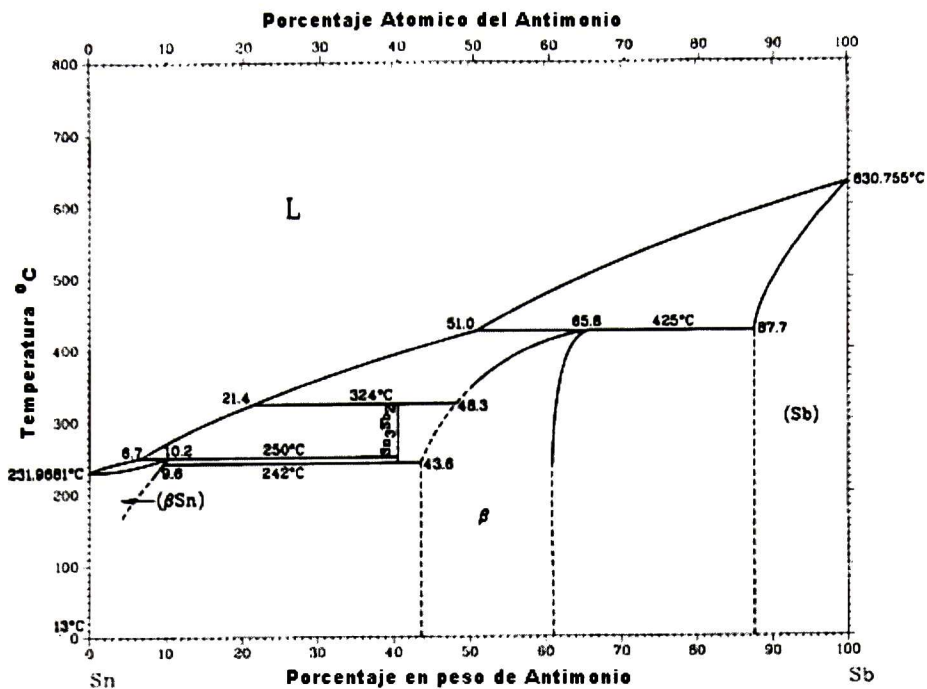


Figura 9. Diagrama de fases de la aleación Sn-Sb

3.4 Antecedentes del proceso de cargado de partículas abrasivas en platos de Sn-Sb

El proceso de cargado es un proceso secundario en la fabricación de cabezas magnéticas. El pulido de cabezas magnéticas es realizado con platos de aleaciones de estaño o zinc incrustados con abrasivos. Los platos de pulido son generalmente planarizados usando un cortador de carburo, penetrados con láminas de pulido de alúmina y texturizados con abrasivo en agua soluble. Los platos de pulido son cargados con diamante policristalino con rangos de 0.10 a 0.50 micras. Los lubricantes de pulido son usados durante el proceso de pulido para mantener el tiempo de vida del plato y controlar la recesión del elemento de escritura, la recesión de la alúmina, la mezcla de material entre las capas metálicas y la superficie final.

En la tabla 1 se describen las ventajas cada aleación de estaño, utilizadas para el proceso de pulido

Tabla 1. Tipos de aleaciones de estaño en Platos de pulido

Aleación de plato	Propiedades
Sn-Bi	Su estructura se compone de finos granos y se maquina como polvo en lugar de viruta. Su resultado característico es minimizar la mezcla de material entre las capas metálicas durante el pulido, produciendo mejoras en el funcionamiento eléctrico de la cabeza magnética.
Sn-Sb	Su estructura se compone de granos dendríticos en una matriz eutéctica. Esto provee áreas localizadas para que las partículas de diamante sean incrustadas
Tin-TAC-3000	También conocido como estaño antifricción; esta estructura contiene finas dendritas con límites de grano endurecidos; producidos por pequeños Cu_6Sn_2 .
Zinc A10	El plato de pulido de aleación de zinc posee granos finos con una temperatura de cristalización cercana a la temperatura ambiente. Resultando en menor y consistente vida del plato.

Los platos de aleación de estaño han sido específicamente diseñados para pulir cabezas magnéticas de película delgada. Las ventajas de estas aleaciones los hacen superiores sobre los platos de pulido tradicional en las siguientes características:

- ✓ Proceso de pulido con abrasivo fijo recargable
- ✓ Menor mezcla de material entre las capas metálicas y por lo tanto mayor producción en características eléctricas
- ✓ Menor contaminación residual de metal en las cabezas magnéticas
- ✓ Menor consumo de diamante

El estaño y sus aleaciones son una clase de material donde las temperaturas de cristalización están por debajo de la temperatura ambiente, esto significa que no endurecen a temperatura ambiente. Esto es muy importante para el diamante incrustado en el plato de pulido, ya que el material del plato de pulido no se endurecerá durante el proceso de cargado, permitiendo al diamante incrustarse en el plato. El problema de los metales con baja temperatura de cristalización es que no sostienen efectivamente el diamante. Los platos de pulido de Tin TAC-3000 y Sn-Sb evitan este problema al tener un alto control en

la estructura del grano. Como resultado el diamante incrustado se fija en los límites de grano, lo cual previene que el diamante se desprenda y se role.

Algunos de los beneficios de proceso de pulido de abrasivo fijo para cabezas magnéticas de película delgada incluyen:

- ✓ Minimizar la recesión del elemento escritor
- ✓ Minimizar la recesión de la alúmina
- ✓ Menor rolado de la alúmina
- ✓ Menor mezcla de material entre las capas metálicas
- ✓ Reducción de diamante incrustado en la cabeza magnética
- ✓ Incremento de vida del plato
- ✓ Perfiles consistentes del plato de pulido
- ✓ Superficies pulidas

3.5 Antecedentes del proceso de pulido

Los principios científicos para la base de los procesos de maquinado abrasivo pertenecen al dominio de la tribología. La tribología es definida como la ciencia y la tecnología de superficies interactuando en un movimiento relativo. La tribología es conocida de manera general como el estudio de la fricción, lubricación y desgaste.

En el maquinado abrasivo, usualmente el principal objetivo es minimizar la fricción y el desgaste del abrasivo mientras se maximiza el desgaste en la pieza de trabajo. Otros objetivos son la calidad de la pieza de trabajo, incluyendo la especificación de la textura de la superficie y la prevención por daño térmico.

3.5.1 Procesos abrasivos

Los procesos de maquinado abrasivo son técnicas de manufactura las cuales emplean partículas granulares muy duras para el maquinado, abrasión o pulido con la finalidad de modificar la forma y la textura de la superficie de las partes manufacturadas.

Estos procesos son usados principalmente para producir partes con alta calidad con gran exactitud y tolerancias muy pequeñas. Algunos ejemplos de partes manufacturadas son lentes de contacto, agujas, componentes electrónicos, obleas de silicio y rodamientos.

Mientras que la exactitud y los requerimientos de textura de la superficie son razones en común para seleccionar los procesos abrasivos, existe otra razón en común. Los procesos abrasivos son la selección natural para el maquinado y terminado de materiales duros y superficies endurecidas.

La mayoría de los procesos abrasivos pueden ser catalogados en uno de los cuatro grupos: desbastado, afilado, pulido y abrillantado.

3.5.1.1 Desbastado

En el desbastado, la maquina abrasiva es una rueda de desbaste que se mueve a una muy alta velocidad comparada con otros procesos de maquinado. Las velocidades entre las superficies son típicamente del rango de 20 a 45 m/s. Para el desbastado en alta velocidad la rueda se mueve a velocidades de hasta 140 m/s con ruedas especialmente diseñadas.

Aunque el desbastado se puede llevar a cabo sin lubricación, el desbastado húmedo es preferido cuando sea posible, debido a la reducción de fricción y a la mejora en la calidad de las superficies producidas. Entre los lubricantes más usados se encuentran el aceite en emulsiones de agua y aceite puro.

3.5.1.2 Afilado

En el proceso de afilado, las partículas abrasivas o granos como se conoce comúnmente, están fijados a la herramienta, como lo están en el desbastado. El proceso de afilado se utiliza principalmente para conseguir la textura de la superficie en las paredes de un cilindro. Las piedras de afilado se presionan de manera radial en contra las paredes del cilindro.

3.5.1.3 Pulido

En el pulido, el abrasivo libre se introduce entre la superficie del pulidor y la pieza de trabajo. El abrasivo libre está suspendido usualmente en un medio líquido, como el aceite, proporcionando lubricación y transporte al abrasivo. Ambas superficies están sujetas al desgaste. Para mantener la geometría requerida de la superficie de la pieza de trabajo es necesario prestar especial atención a los movimientos efectuados para balancear el desgaste.

3.5.1.4 Abrillantado

El proceso de abrillantado, como el pulido, se emplea abrasivo libre. En este caso, la presión es aplicada en el abrasivo mediante con un cojinete o un paño suave. Esto permite al abrasivo seguir los contornos de la superficie de la pieza de trabajo y limita la penetración de granos individuales en la superficie. El abrillantado con abrasivo fino es una acción muy suave entre los granos y la pieza de trabajo, asegurando así rayones de muy poca profundidad en la superficie.

El objetivo principal del abrillantado es modificar la textura de la superficie mas que la forma. Superficies tipo espejo y altamente reflectivas se pueden producir mediante el proceso de abrillantado. El material se remueve a una tasa muy baja. Por eso la geometría de la superficie deberá estar muy cerca de la forma final antes del inicio del proceso de abrillantado.

3.5.2 Abrasivos

Para todas las clasificaciones de procesos de maquinado abrasivo, el grano del abrasivo debe ser más duro que la pieza de trabajo en el punto de contacto y a la temperatura de interacción. Estas temperaturas pueden ser muy altas y de corta duración, los granos de abrasivo deben retener su dureza incluso cuando estén calientes. Esto aplica para todos los procesos abrasivos sin excepción, ya que si la pieza de trabajo fuera más dura que el grano, entonces sería el grano el que sufriría el mayor desgaste.

Algunos valores de durezas típicas para el diamante, CBN (por sus siglas en ingles *Cubic Boron Nitride*, nitrato cúbico de boro) y carburo de silicio son 56-102, 42-46 y 24 GPa

respectivamente. Los valores son aproximados y pueden cambiar dependiendo de la forma en particular o a la composición del abrasivo.

La dureza de los abrasivos es sustancialmente reducida a las temperaturas de contacto típicas entre el grano y la pieza de trabajo. A 1000°C la dureza en la mayoría de los abrasivos es reducida aproximadamente a la mitad. Afortunadamente la dureza de la pieza de trabajo también se reduce.

Los abrasivos más comunes son el óxido de aluminio y el carburo de silicio. Estos abrasivos están disponibles en un gran número de formas, son baratas y con alta disponibilidad. El diamante y el CBN son mucho más caros, aunque el número de aplicaciones esta en aumento debido a su mayor dureza y resistencia al desgaste.

3.5.2.1 Superabrasivos

El termino “superabrasivo” es usado para nombrar a cualquiera de los dos abrasivos más duros, el diamante y el CBN. El diamante es el más duro entre los materiales abrasivos conocidos. El CBN es el más reciente de los cuatro mayores tipos de abrasivos, y el segundo después del diamante. La dureza del diamante es tal que sobre él se basa la escala de dureza de Mohs, asignándole diez como máximo posible.

La capa del compuesto abrasivo de una rueda de superabrasivo, como el diamante, está limitada a un pequeño borde o capa sobre una base plástica o metálica para así reducir la cantidad del costoso diamante o de CBN.

El diamante sintético no solo vino a sustituir a diamante natural, sino que las variaciones en sus procesos de síntesis han traído un amplio espectro de tipos de grano, con diferentes características de friabilidad y un gran rango de aplicaciones.

3.5.2.1.1. Diamante natural

El diamante natural crece predominantemente en forma de octaedro y provee varios bordes agudos, óptimos para las herramientas de diamante. También se obtienen en forma de piedras largas, creadas por la disolución parcial de la forma octaédrica. Las formas largas

del diamante también son producidas al comprimir y pasar por el molino de bolas los fragmentos de diamante.

Los granos abrasivos de diamante natural provienen de los cristales considerados no óptimos para la joyería debido a sus defectos e inclusiones. Antes de su uso, el diamante es comprimido y filtrado a través de una serie de tamices. Los fragmentos obtenidos poseen formas aleatorias, bordes agudos y gran fuerza o baja friabilidad. El color amarillento característico se debe a los átomos de nitrógeno dispersados en el látice. La forma de bloque de los diamantes sintéticos monocristalinos contrasta con la forma irregular del diamante natural generado por compresión.

3.5.2.1.2. Diamante sintético

Los diamantes sintéticos pueden ser monocristalinos o policristalinos. Los gránulos monocristalinos son utilizados por aplicaciones demandantes muy particulares. El simple reconocimiento de su forma cúbica o cubo-octaédrica refleja la estructura cristalográfica característica del diamante. Los cristales casi perfectos son obtenidos mediante un crecimiento lento, procesos de nucleación de baja densidad, con inclusión metálica limitada y baja o muy pequeña interacción entre gránulos que crecen dentro de la sintetización.

Los gránulos policristalinos con alta friabilidad son producidos mediante una alta aceleración de la tasa de nucleación dentro de la prensa, así el diamante nuclea precipitándose en un gran número dentro la sintetización. Debido a la gran aglomeración en la fusión, el patrón normal de crecimiento es inhibido, por ello los gránulos tienen formas geométricas indefinidas que asemejan un aglomerado de cristales pequeños. Estos son más friables y tienen lados más rugosos comparados con el diamante natural.

Respecto a la experimentación pre-existente respecto a la forma de las partículas de diamante sintético, Shibata et al. en su trabajo "Análisis de perfiles de superficies pulidas con partículas de diamante de diferentes formas" concluye que los índices de irregularidad en perfil pulido de la superficie de un espécimen de ferrita pueden correlacionarse con las características de forma de la partícula de diamante, en la cual la poligonalidad de la partícula juega el rol más importante.[Shi03]

3.5.2.1.3. CBN

El nitrato cúbico de boro o CBN es una forma cristalina alotrópica del nitrato de boro que casi alcanza la dureza del diamante. La popularidad del CBN radica en su dureza, resistencia térmica, que es más alta que la del diamante, permitiendo regiones de trabajo de 1900°C, y una resistencia térmica a las aleaciones ferrosas. El CBN es utilizado principalmente para el desbaste herramientas de acero de alta calidad.

Debido a su naturaleza química, el CBN no tiene afinidad por el acero al bajo carbón, y por ello se emplea para el desbaste de aceros a alta velocidad. En la práctica, el desbaste húmedo con CBN se antepone al desbaste seco [Mar04].

3.5.3 Antecedentes del proceso de pulido de cabezas magnéticas

En la actualidad los medios de almacenaje requieren alta velocidad, alta capacidad y alta confiabilidad a bajo costo, los discos duros son ampliamente utilizados para el almacenamiento de información digital. Después de algunos años de desarrollo de tecnología, la densidad de grabación de un disco duro ha excedido 100Gb por pulgada cuadrada. El disco duro incluye cabezas magnéticas compuestas por partículas delgadas para la grabación y reproducción de información en el medio de almacenaje. El lado de la cabeza magnética que está en dirección al medio de almacenamiento es llamado superficie de deslizamiento aéreo.

Para una cabeza magnética que lee la información del medio de almacenamiento, es importante mantener la altura del elemento lector (La altura medida verticalmente desde la superficie de deslizamiento aéreo al elemento lector) al nivel de diseño para asegurar el óptimo desempeño del elemento lector.

La altura final del elemento lector se obtiene al pulir la superficie de deslizamiento aéreo, en el proceso de depositado de la oblea, el elemento lector tiene una altura mayor que su valor de diseño, por ello es importante mantener la precisión del pulido para así mantener la precisión de la altura del elemento lector.

También es importante que el elemento escritor, el cual escribe la información en el medio de almacenamiento, que la altura de la garganta (la altura vertical al espacio entre los dos polos usados para la operación de escritura y la superficie de deslizamiento aéreo) se mantenga en su valor de diseño. Mantener la precisión del pulido de la superficie de deslizamiento aéreo es importante, ya que la altura de la garganta es también dependiente del pulido de esta superficie.

La superficie de pulido esta dispuesta en una dirección vertical respecto a la superficie de la oblea, la cual esta formada en dos dimensiones por una serie de cabezas magnéticas, la oblea es cortada antes del proceso de pulido para así exponer la superficie de pulido. Mas adelante es necesario cortar la oblea a lo largo de la dirección a la cual la superficie de pulido esta dispuesta en una serie de hileras, formadas por un arreglo de cabezas magnéticas donde la superficie de la hilera es pulida al mismo tiempo. La hilera se sostiene con un herramental y se presiona en una mesa de pulido revolvente para llevar a cabo el proceso de pulido [Fuj06].

3.5.3.1 Experimentación pre-existente en la distribución de presiones durante el pulido

G. Q. Cai et al. en su publicación “Análisis en la distribución de presiones en el pulido” concluyen que la distribución de la presión en el pulido no es uniforme y que la presión se incrementa significativamente cerca del borde de la pieza de trabajo [Cai97] y que pueden correlacionarse con el comportamiento de los valores de resistencia en los bordes de la hilera de cabezas magnéticas al final del proceso de pulido publicado por Quezada J. M. en su reporte “Perfil de resistencia en pulido para el tipo de cabeza Femto” [Que07].

Capítulo 4. Materiales y Métodos

En este capítulo se presentan los detalles generales de la caracterización de las partículas abrasivas, de la aleación de Sn-Sb y su procedimiento de fabricación. Así como la descripción del proceso de incrustación del material abrasivo en el plato y el proceso de pulido de las cabezas magnéticas.

4.1 Proceso de fabricación de platos de Sn-Sb

Para la fabricación de la aleación de los platos de pulido se utilizan elementos puros. La fuente de extracción del estaño es China, ya que en la actualidad es el mayor proveedor del mundo. Para el caso del antimonio la fuente de extracción es Tailandia. La pureza esperada de ambos materiales es del 99.98%.

Los elementos llegan a la planta de fabricación de platos en forma de lingotes de aproximadamente 40 Kg. Se realizan pruebas de composición química para asegurar que cumplan con las especificaciones de contenido del elemento y otros que representen una contaminación adicional, como lo son el arsénico y el plomo ($As < 0.005\%$ y $Pb < 0.05\%$). Posteriormente se funden por peso en la proporción especificada (97.5% de estaño y 2.5% de antimonio) a una temperatura de 300°C y es agitado de manera permanente mientras se retiran las impurezas (también llamadas escorias).

Cuando el metal está limpio es bombeado a un molde rectangular enfriado por agua, resultando en un lingote de 1.8 m de longitud, 0.8 m de ancho y de 42-44 mm de espesor. Antes de fabricar un nuevo lote de aleación, los lingotes son almacenados por lotes de fundición en espera de los resultados de composición química

Los lingotes son calentados a 80°C y rodados de 8 a 9 veces para reducir su espesor hasta 10 mm. Se cortan en círculos de 17.5" utilizando cortadoras de chorro de agua.

Se realiza una inspección visual en los platos principalmente en búsqueda de fracturas, impurezas y porosidades; los platos aprobados pasan al proceso de limpieza y son enviados

al cliente. El proceso de fabricación de la aleación de Sn-Sb se detalla en las Fig. 10 y 11. [Fin97].

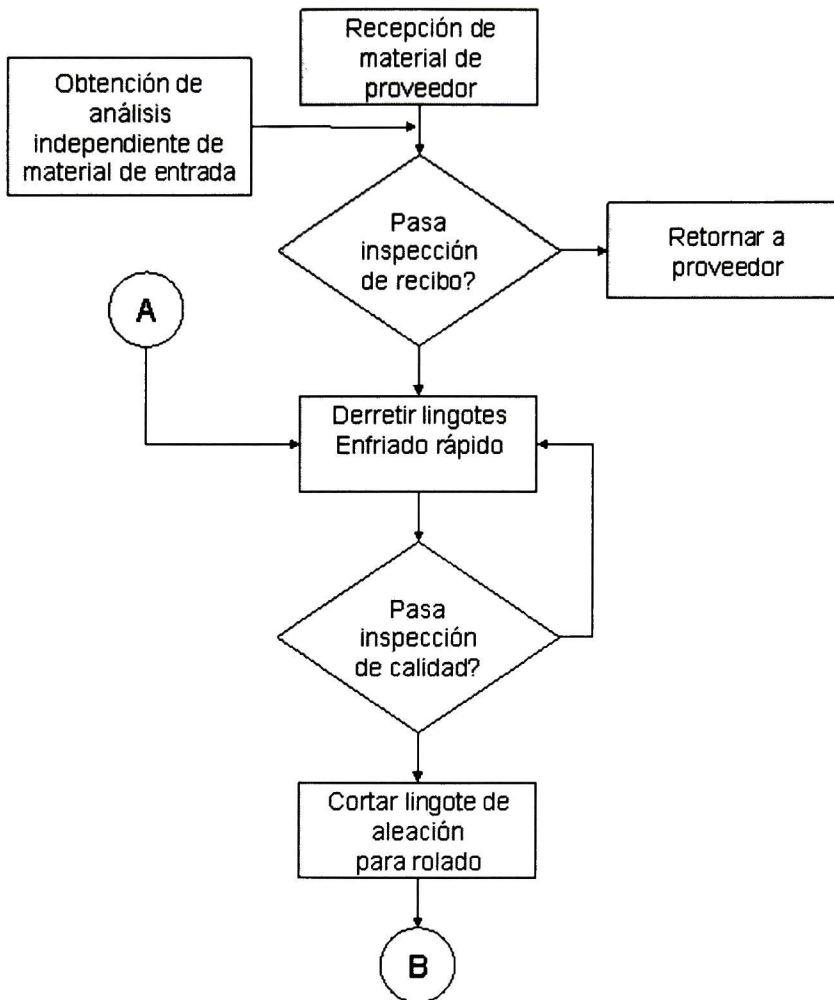


Figura 10. Diagrama del proceso de fabricación de platos de Sn-Sb (Primera parte)

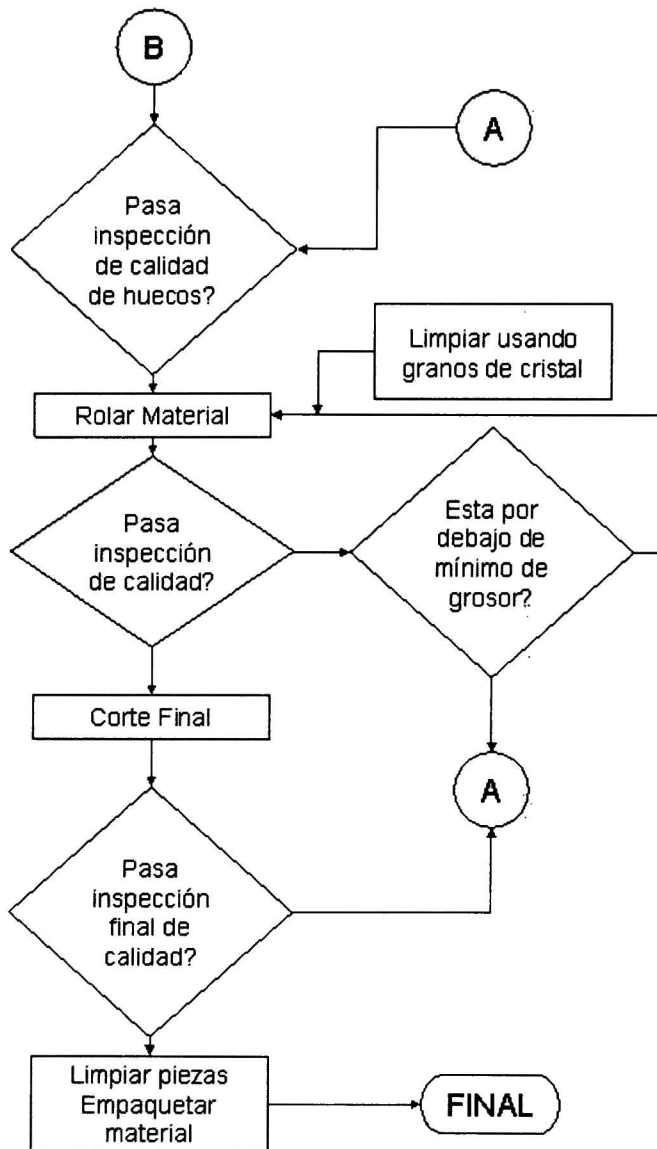


Figura 11. Diagrama del proceso de fabricación de platos de Sn-Sb (Segunda parte)

4.2 Caracterización de los platos de pulido

Las propiedades que se caracterizaron de la aleación de los platos de Sn-Sb fueron principalmente la composición química y propiedades mecánicas, además los parámetros de tamaño y distribución de tamaño de partícula de las partículas de diamante utilizadas como medio de abrasión para el pulido de cabezas magnéticas.

4.2.1 Composición química

La composición química de los platos utilizados en el presente estudio fue caracterizada por el proveedor, mediante el método de prueba de absorción atómica. Los resultados reportados son respecto al contenido de antimonio. Los análisis se realizaron en septiembre de 1999. El muestreo de composición química dentro del plato fue tomado del eje horizontal de los platos 1 y 2. Cada plato fue seleccionado de manera aleatoria de lingotes separados. El análisis fue ejecutado por laboratorios Yeager [Fin97].

4.2.2 Propiedades mecánicas

La caracterización de propiedades mecánicas de los platos de Sn-Sb se ejecutó por parte de los laboratorios Yeager [Fin97]. Dentro del reporte de propiedades mecánicas se incluye la dureza Brinell, módulo de elasticidad, resistencia a la tensión y esfuerzo de cedencia.

4.2.2.1 Dureza Brinell

Los ensayos de dureza Brinell fueron suministrados por el proveedor utilizando condiciones de carga de 187.5 kgf, un diámetro de indentador de 3 mm de acero y mantenida por un tiempo mínimo de 30 seg con un error de prueba no mayor a 2% de acuerdo a la norma ASTM No. E 10 [Cha99]. Las muestras ensayadas fueron dos platos de Sn-Sb escogidos al azar de la línea de producción y cuyos identificadores son: *plate1* y *plate2*. La dureza Brinell fue calculada a partir de la carga máxima y el área de la marca de indentación utilizando la siguiente expresión:

$$BHN = \frac{P}{(\pi D / 2)(D - \sqrt{D^2 - d^2})} = \frac{P}{\pi D t} \quad (3)$$

Donde:

P = carga aplicada en kg

D = diámetro de la bola en mm

d = diámetro de la indentación en mm

t = profundidad de la impresión en mm

Las unidades en las que se reporta la dureza Brinell son en números BHN o en kilogramos por milímetro cuadrado.

4.2.2.2 Resistencia a la tensión, módulo de elasticidad y esfuerzo de cedencia

Las propiedades de resistencia a la tensión, módulo de elasticidad y esfuerzo de cedencia se determinaron mediante ensayos de tensión uniaxial y los ensayos fueron realizados por el proveedor. Los detalles de los ensayos no fueron proporcionados. Sin embargo, se reporta un método de obtención del esfuerzo de cedencia a partir de los resultados de dureza Brinell [Die86]. El esfuerzo de cedencia es proporcional a la dureza Brinell por un factor de 2.8 a 2.9 como en (4). Este factor representa las condiciones de restricción asociadas a los ensayos de contacto, que normalmente se llevan a cabo bajo condiciones de deformación plana.

$$\frac{H}{\sigma_Y} \approx 2.8 - 2.9 \quad (4)$$

4.3 Proceso de cargado de partículas abrasivas en platos de Sn-Sb para el proceso de pulido de cabezas magnéticas

Los platos de Sn-Sb utilizados en el presente estudio fueron cargados con partículas de diamante en suspensión siguiendo el mismo procedimiento de la línea de producción de cabezas magnéticas de Hitachi Guadalajara. El diagrama a bloques de la Fig. 12 describe en forma general el proceso de preparación de platos.

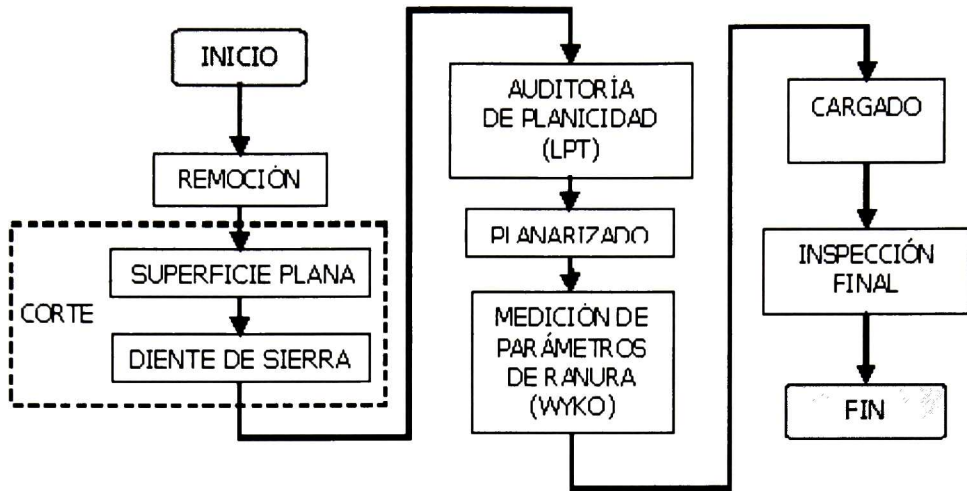


Figura 12. Diagrama a bloques del proceso de cargado de platos

La primera fase en el proceso de cargado de platos es el re-acondicionamiento, que consiste en la remoción del diamante remanente del último pulido. Para este proceso se utiliza una máquina rotativa acondicionada como texturizadora a una velocidad de rotación de 30 rpm, utilizando una solución de remoción y un anillo de acero, con un tiempo del proceso es 2 min. El objetivo de la operación es extender la vida útil de los buriles, además no existen parámetros a medir o criterios de inspección.

A continuación la fase de corte genera a la superficie del plato una forma de diente de sierra. El primer control de proceso es la medición del grosor del plato contra un patrón, si el plato está fuera de la especificación es enviado al área de rechazo de platos para su envío a proveedor, si está dentro de la especificación entonces se procede a limpiar el plato con una toalla limpia y se monta el plato en la máquina cortadora (*Hyprez Precision Facing / Lapping Machine*) donde inicia el ciclo de corte del plato para obtener una superficie plana y continúa con el ciclo de creación de ranura para generar una superficie de diente de sierra con un tiempo total de 30 minutos a una velocidad de 200 rpm. Se retira el plato de la máquina cortadora y se envía al proceso de limpieza.

El segundo control de proceso es la auditoría de planicidad, se utiliza la máquina LPT (*Lapping Plate Topographer*). Esta máquina no comercial, se fabricó en el laboratorio de desarrollo de IBM en Alemania [Ser05], esta máquina mide la altura relativa de la

superficie del centro hacia la superficie de los extremos, cuyos límites de control de proceso son de +/- 8 micras. Cualquier plato fuera de los límites de control es enviado de regreso a la fase de corte.

En la fase de planarizado se remueve el material de los picos de diente de sierra para convertirlos en planicies mediante la máquina pulidora Engis, utilizando un anillo de acero y se dispensa solución de planarizado, a una velocidad de rotación de 30 rpm y un tiempo de 9 a 12 minutos (dependiente del estado del anillo), y continuación se envía al proceso de limpieza.

La medición de ranura mediante el uso del interferómetro (Modelo Wyko), que es el tercer proceso de control del plato, consiste en medir la tasa entre planicie y longitud del ciclo completo a una especificación del $42\% \pm 2$ en 8 sitios definidos en el radio del plato, si el plato está fuera de especificaciones es enviado de regreso a la fase de corte.

Para la fase de carga el plato se retorna a la máquina donde fue planarizado, se cambia a un anillo cerámico de ZTA (por sus siglas en inglés *Zirconia toughened alumina*: alumina endurecida con zirconia) y se dispensa la mezcla con diamante a una tasa de 3 ml por minuto, a una velocidad de rotación de 40 rpm por un tiempo de 90 minutos y se envía al proceso de limpieza.

El cuarto y último proceso de control es la inspección final del plato, realizada por un operador, donde a simple vista, se buscan defectos en la superficie del plato tales como líneas concéntricas, anillos concéntricos, porosidades, rayones con patrón circular y rayones aleatorios.

En la fase final del proceso los platos se cubren con una película plástica para protegerlos del polvo del ambiente durante el proceso de transporte al área de pulido.

4.4 Características del medio de abrasión: Nanopartículas de diamante

Las cabezas magnéticas están constituidas por cerámicos avanzados tales como la alúmina y AlTiC. La alta dureza de estos materiales hace al diamante el abrasivo óptimo para su maquinado.

4.4.1 Tamaño y distribución de tamaños de partícula

Para la medición de la distribución del tamaño de partícula se utilizó el equipo HORIBA LA-920, usando las variables del equipo como a continuación se describen durante la etapa de medición: lámpara de tungsteno con un mínimo de potencia del 70%, potencia del láser con un mínimo de 80%, activando la velocidad de recirculación en 4, la fuente de mezcla ultrasónico encendida y seleccionando 10 repeticiones de medición por muestra.

4.4.2 Morfología de las partículas abrasivas

La caracterización de la morfología de las muestras de partículas abrasivas se llevó a cabo por Microscopía de Barrido Electrónico (LEO 1550 Gemini), con un voltaje de excitación de 5 KeV y con filamento de tungsteno utilizando el detector de electrones secundarios. Con esta técnica de caracterización se obtuvieron varias imágenes de 30K aumentos así como la medición en longitud de las diagonales de las partículas abrasivas aisladas, de 7K aumentos para las aglomeraciones de partículas abrasivas embebidas en el plato de pulido y de 4K aumentos para la planicie del plato de pulido embebido con partículas abrasivas.

4.4.3 Caracterización estructural de las partículas abrasivas

En el presente estudio se utilizó un Sistema Micro Raman Labram Dilor con una fuente de excitación de He-Ne de longitud de onda 632.8nm para identificar el material del que están constituidas las partículas abrasivas. La información con la que se cuenta es que son partículas de diamante sintético policristalino de tamaños de partícula promedio del orden de pocos cientos de nanómetros. La evidencia experimental de que las partículas abrasivas son de diamante sintético se obtiene con la identificación de una señal Raman en 1335cm^{-1} .

4.5 Medición de las partículas de diamante incrustado en el plato de pulido

El programa de cómputo ImageJ es un programa para procesamiento de imágenes desarrollado por el NIC (Por sus siglas en inglés *National Institutes of Health*). ImageJ fue diseñado en una arquitectura abierta y permite adecuaciones vía agregados de *Java* y

grabación de macros. La adquisición, análisis y procesamiento automático de imágenes pueden ser desarrollados utilizando el editor incorporado y un compilador *Java*.

Utilizando estas propiedades de ImageJ se desarrollo un macro o secuencia de comandos. Este macro analizar la imagen obtenida por Microscopía de Barrido Electrónico para calcular el porcentaje de área cubierta por partículas abrasivas en la planicie del plato de pulido. Este programa se localiza en el capítulo 7.2

4.6 Proceso de pulido de cabezas magnéticas de discos duros

Para este proceso se utilizo una máquina pulidora no comercial desarrollada por el laboratorio de IBM de Rochester, Minnesota [Chu94], la cual utiliza el plato de pulido como vehículo de desbaste y dos ejes individuales XY para posicionar la hilera de cabezas magnéticas en las coordenadas deseadas, esta máquina es controlada por una computadora industrial.

El objetivo principal es desbastar la hilera hasta llegar a un valor de SH (Altura del sensor de lectura) usualmente 90 nm y dependiente de cada producto. La altura final puede ser diferente dentro de cada producto dependiente del nivel de ingeniería.

Como se muestra en la Fig. 13 la cinemática consiste en el plato de pulido rotando en dirección en contra a las manecillas del reloj y la hilera oscilando en movimiento lineal sobre el radio del plato (En la posición que corresponde a las 3:55 en el reloj).

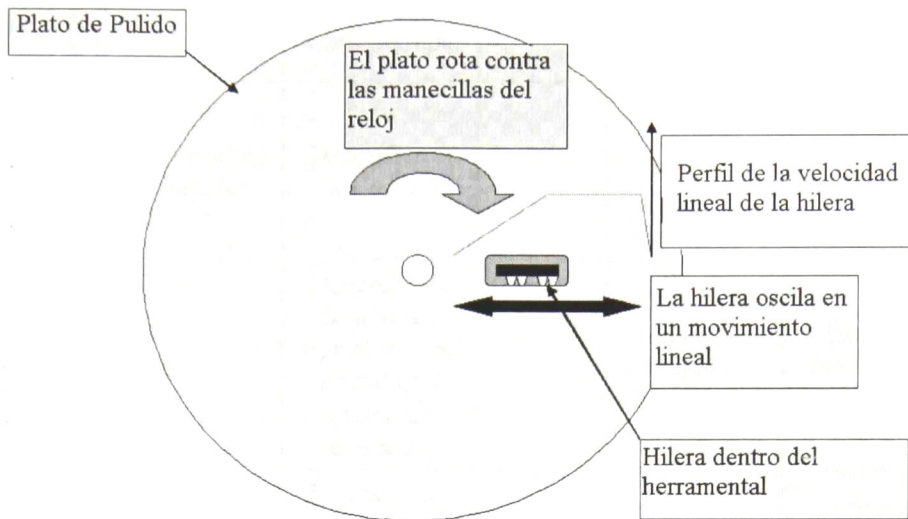


Figura 13. Diagrama esquemático de la cinemática del proceso de pulido

El programa para pulido consiste en 4 fases, cada una con diferentes RPM y perfiles de presión. Se definieron altas tasas de remoción en las fases tempranas y bajas tasas de remoción para las fases finales.

En la tabla 2 podemos apreciar algunos de los parámetros de salida del proceso, son medidos principalmente por el mismo equipo de pulido y por un equipo de medición eléctrica de cabezas magnéticas.

Tabla 2. Algunos parámetros de salida del proceso de pulido

Parámetro/ Unidad	Límite Superior	Límite Inferior	Objetivo	Plan de muestreo / Equipo de medición
Índice de puenteos/ %	3	N/A	1.4	100% / Pulidora
SH 3Sigma / Nanómetros	18	N/A	12.8	100% / Quasi
Tiempo de ciclo de pulido / Minutos	10.0	N/A	8.0	100% / Pulidora

Algunas de las variables del proceso de pulido se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Variables principales del proceso de pulido

Salida del proceso	Unidad de medida	Valor nominal	Rango esperado	Metrología	Esquema de monitoreo
Velocidad del carro	Ángulo(grados) / Aceleración	Dependiente de la fase		Motores de control digital ajustados por el programa	
Velocidad del plato	rpm	Dependiente de la fase / sigma/ tiempo de pulido / índice de puentes		Motores de control digital ajustados por el programa	Conteo de revoluciones por minuto
Presión de pulido	0 a 10 psi divididos en una escala de 0 a 255	Dependiente de la fase / sigma/ tiempo de pulido / índice de puentes		Medidor digital de presión	Calibración periódica de acuerdo con el manual de mantenimiento
(Entrada) Rayones en el plato	Inspección Visual	No rayones visibles	No rayones visibles	Inspección visual	100% de platos
(Entrada) Número de Buenos contactos	Número de Buenos contactos	> 70% por hilera y > 50% por zona	65% - 100% por hilera y 45% - 100% por zona	Medición del Multiplexor de resistencia en la máquina de pulido	100 % de hileras

El programa de pulido se compone de etapa de inicio, etapa de verificación de condiciones iniciales y etapa de pulido (dividida en 4 fases).

Cada una de estas etapas y fases es descrita a continuación.

En la etapa de inicio (o inicialización) se valida que la desviación estándar de la altura del sensor de 3 corridas consecutivas sea menor a 20, que el plato sea del tipo 53 y esté en la operación 760, además que la cantidad de corridas anteriores del plato sea menor que 60.

La segunda etapa es la verificación de condiciones iniciales donde se valida si las cabezas magnéticas de la hilera presentan mezcla de material entre las capas metálicas aplica el ciclo de limpieza, después se aplicó la rutina de asentamiento de la hilera sobre el plato y midió la altura promedio de las cabezas magnéticas de la hilera sea menor a 180nm.

En la fase 1 de la etapa de pulido se removió material hasta 100 nm del objetivo final, se calcula si el parámetro 3 sigma de la altura del sensor es mayor a 180nm y le aplica una presión de 130, si es menor a 180nm entonces aplica una presión de 126. Esta etapa se realiza a una velocidad única del plato de pulido a 6.7 rpm.

En la siguiente fase de la etapa pulido se removió aproximadamente 60 nm de material de la hilera seleccionando la presión aplicada a la hilera en 102, 116, 142 o 156 y velocidad de rotación del plato en 5.1, 6.2, 6.7, 6.9 o 7.1 rpm, las presiones y velocidades del plato dependen de las condiciones de la hilera y de parámetros específicos de cada tipo de cabeza magnética. Finalizando a 50 nm del objetivo de altura del sensor

Para la fase 3 se removió aproximadamente 30 nm y dependiendo de las condiciones de la hilera y parámetros de cada tipo de cabeza magnética seleccionando presiones a 76, 82 o 90 y velocidades de plato a 3.5, 3.7, 3.9, o 4.1 rpm.

Para la última fase (la cuarta) se removió aproximadamente 10 nm de material, seleccionando la presión aplicada a la hilera en 64, 72, 76 o 82 y velocidad de rotación del plato en 5.1, 6.3, 3.1, 3.2, o 3.3 rpm, las presiones y velocidades del plato dependiendo de las condiciones de la hilera y de parámetros específicos de cada tipo de cabeza magnética.

Como podemos apreciar en la fase 1 hace remoción variable de material pero con velocidad de rotación única para el plato y las siguientes fases hacen remoción fija de material, pero con velocidades diferentes del plato.

Capítulo 5. Resultados y discusión

Es este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de los materiales que compone el plato de pulido y de las partículas abrasivas que se incrustan en él. También se presentan el análisis estadístico de los parámetros de desempeño en el proceso de pulido, la comparación estadística entre platos de pulido, el modelo propuesto de predicción de vida dependiente de un parámetro de proceso y las estimaciones del modelo propuesto para cada tipo de cabeza magnética.

5.1 Caracterización de platos de pulido de Sn-Sb

La caracterización de la aleación de los platos de pulido se llevó a cabo mediante el análisis de composición química y propiedades mecánicas (esfuerzo, resistencia, dureza), cuyos resultados se presentan a continuación.

5.1.1 Composición química

El resumen de resultados de composición química, medida por absorción atómica, para dos platos de pulido analizados, basado en el reporte suministrado por el proveedor se presenta en la tabla 4. Las mediciones fueron efectuadas en muestras tomadas sobre un eje horizontal en cada uno de los platos.

Tabla 4. Reporte de porcentaje de Antimonio

Muestra	% de antimonio	Fuente
100A	2.67	Lingote
100B	2.70	Plato terminado
100E	2.49	Plato terminado-h1*
100N	2.46	Plato terminado-h1*
100W	2.63	Plato terminado-h1*
100S	2.70	Plato terminado-h1*
101E	2.61	Plato terminado-h2*
101W	2.63	Plato terminado-h2*
101S	2.58	Plato terminado-h2*
101N	2.70	Plato terminado-h2*

Los valores de porcentaje en peso de antimonio contenido en las diferentes piezas de los platos se encuentran entre 2.49% y 2.70% con un promedio de 2.57% para el plato *h1* y 2.63% para el plato *h2*. Los resultados indicados en la tabla 4 muestran que el contenido de antimonio es muy similar para los dos platos y bastante homogéneo en la dirección radial de los mismos. Por lo tanto, las variaciones en desempeño en el pulido de cabezas magnéticas debido a variaciones de composición química de la aleación de los platos de pulido podrían ser descartadas con estos resultados. A razón de que estos resultados están basados en reportes del proveedor, se recomienda un estudio futuro para corroborar la homogeneidad en composición química de los platos de pulidos.

5.1.2 Propiedades físicas

Las propiedades mecánicas, esfuerzo de cedencia, resistencia a la tracción, dureza Brinell y módulo de Young de dos platos de pulido de referencia se muestran en la Tabla 5. Estas pruebas fueron realizadas también por el proveedor. Comparando estos resultados reportados para los platos 4788 y 5359 comparados con los datos de la literatura para el estaño puro se observa que la dureza Brinell reportada es 3.9 [Asm90], la cual es menor a la mitad a la dureza de los platos. A diferencia de la composición química que es prácticamente la misma para los dos platos, los valores de las propiedades físicas presentan diferencias entre ambos platos. Por ejemplo, las variaciones de un plato a otro de la dureza Brinell y del módulo de Young son del 7% y 3%, respectivamente. Estas diferencias en cuanto a las propiedades mecánicas de los platos podrían explicar en parte la dispersión observada en cuanto su desempeño después de haber sido cargados con diamante.

Tabla 5. Reporte de pruebas físicas a platos de Sn-Sb

	Plato 4788	Plato 5359
Esfuerzo a la cedencia-MPa	33.0	36.9
Resistencia a la tracción-MPa	41.5	44.2
Dureza Brinell	13.3	12.4
Modulo de Young - GPa	23.0	23.7

5.2 Análisis de tamaño y distribución de tamaño de partículas

El tamaño de partícula es importante porque se debe cumplir con la especificación de 0.179 marcada por Hitachi [Hit05], ya que cuando se tiene una distribución de tamaño de partícula más pequeña de la especificación los tiempos de pulido se extenderán y no se tendrá un proceso rentable, por otro lado, si se tiene una distribución de tamaño de partícula más grande a la especificación, los tiempos de pulido serán cortos, y la superficie de deslizamiento aéreo de la cabeza magnética será más rugosa, lo cual se considera un defecto en el pulido.

Se analizó un lote de partículas abrasivas mediante el equipo Horiba modelo LA-920, ubicado con el proveedor, obteniendo los resultados que se muestran en la Fig. 14 y el análisis estadístico en la tabla 6:

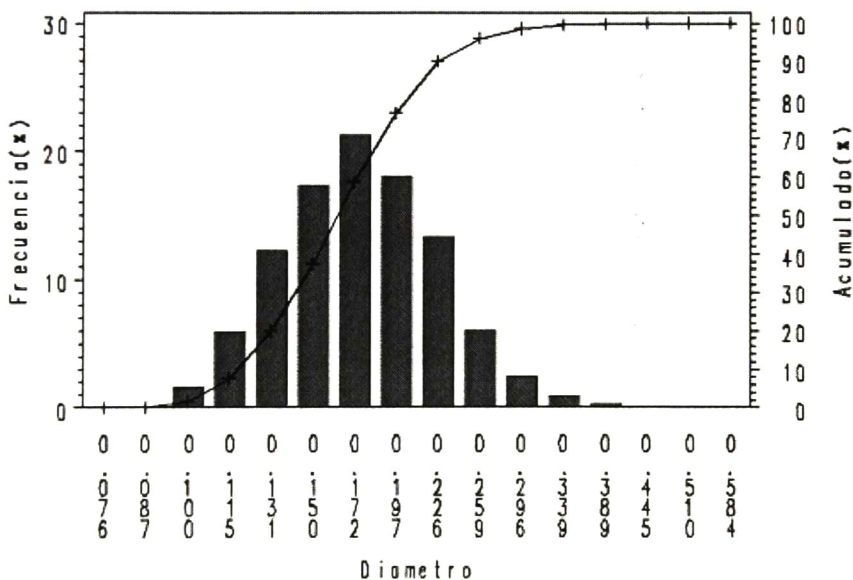


Figura 14. Gráfica de la distribución de tamaño de la partícula abrasiva

En la tabla 6 se muestra el detalle de cada uno de los valores estadísticos del lote, donde se muestra el valor de la media poblacional con un valor de 0.169 um cumpliendo así con la especificación del tamaño de partícula de 0.179 ± 0.01 marcada por Hitachi [Hit05]. En la

Fig. 14 se muestra la distribución del tamaño de partícula, donde se aprecia un solo pico en la distribución, localizado en 0.172 μm .

Tabla 6. Valores estadísticos de la distribución de tamaño de partícula abrasiva

		Diámetro en %:	
Mediana	:0.1629 (μm)	5 (%)	0.108 (μm)
Media	:0.1693 (μm)	10 (%)	0.118 (μm)
Varianza	:2.0188E-3 (μm^2)	50 (%)	0.163 (μm)
Desviación estándar	:0.0449 (μm)	90 (%)	0.225 (μm)
Rango	:0.6626	95 (%)	0.252 (μm)

5.3 Análisis de morfología de las partículas abrasivas

El tamaño de la partícula abrasiva promedio fue de 0.169 μm , por lo que requirió el uso del microscopio de barrido electrónico (SEM) para la inspección y análisis morfológico, ya que la microscopía óptica solo es capaz de detectar objetos mayores a 0.400 μm .

5.3.1 Partículas abrasivas aisladas

Las partículas abrasivas presentan morfología equiaxial y distribución de tamaño homogéneo, mismo que se demuestra comparando las diagonales mayores que son en promedio de 391 nm y diagonales menores promedio de 230 nm como se muestra en la Fig. 15. Las diferencias de tamaño de partícula en comparación con los resultados obtenidos por el equipo Horiba obedecen a su técnica de medición de luz dispersada que supone una forma de partícula esférica

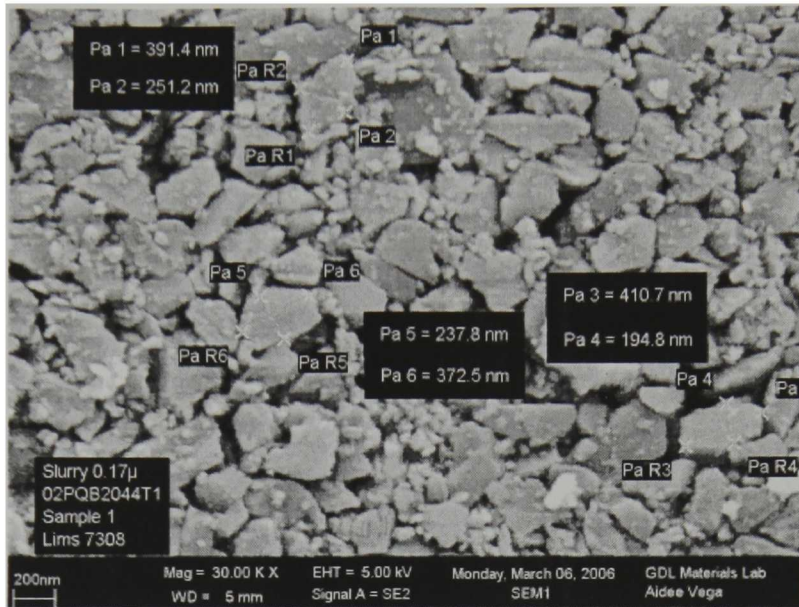


Figura 15. Micrografía de las partículas abrasivas aisladas

5.3.2 Partículas abrasivas incrustadas en el plato de pulido

La Fig. 16 muestra una micrografía de un plato de pulido posterior al proceso de cargado de partículas abrasivas. Como se puede observar en esa micrografía se presenta un típico aglomeración de partículas de tamaño aproximado de 3538 nm x 1965 nm. Si se compara con el tamaño de una partícula individual ese aglomerado es de hasta 10 veces mayor. Este plato fue identificado en el proceso de pulido como fuente de bajo desempeño del parámetro de eléctrico amplitud en las cabezas magnéticas. Entonces, el principal defecto en el manejo de las partículas abrasivas es cuando se presenta una aglomeración de partículas, cuando están incrustadas en el plato, bajo estas condiciones las cabezas magnéticas son sujetas a defectos de rayones en la superficie de pulido. Ese tipo de defectos de cargado pueden deberse a una serie de factores de la línea de producción, que incluyen las condiciones de las partículas, dispersión de las suspensiones, máquina de cargado (flujo de suspensión, condiciones de los discos de cargado, estabilidad de la máquina), entre muchos otros. Este detalle de los platos, en conjunto con las propiedades físicas y químicas de los platos de pulido corresponden a un par de ejemplos para demostrar la complejidad del análisis del desempeño de platos en el proceso de pulido de sensores de computadora

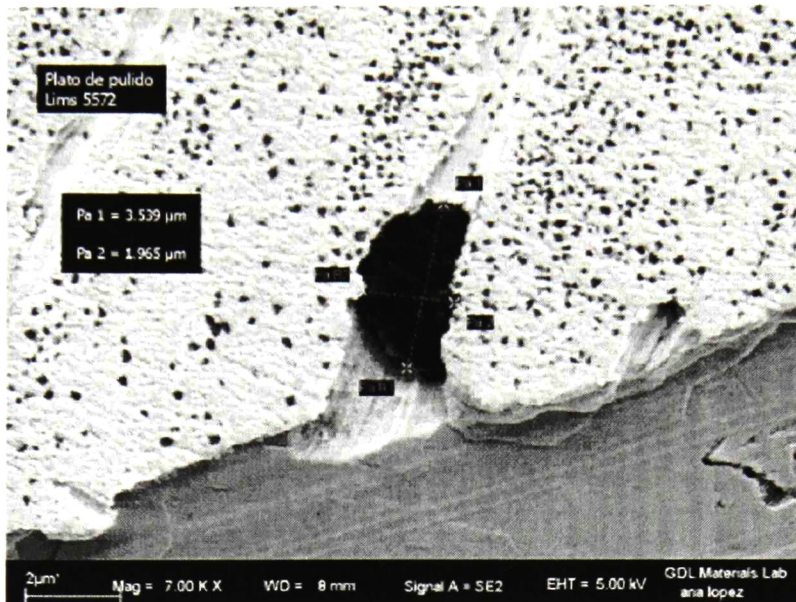


Figura 16. Micrografía de aglomeración de partículas abrasivas en el plato de pulido

5.4 Análisis de datos de desempeño con los parámetros de pulido $laptime$ y $lapuse$

Al ingresar un plato de pulido al área de pulido fino de cabezas magnéticas de la planta de Hitachi, cada uno de los parámetros de tiempo de pulido se registra en una base de datos. En el presente trabajo se planteó el análisis del desempeño de cada platos durante cada uno de los procedimientos de pulido. En la figura siguiente se muestran datos de los parámetros de desempeño $laptime$ vs. $plateuse$ de dos platos seleccionados por sus diferencias en el desempeño (53412 y 53169). Esta gráfica representa todo el historial de desempeño de dos platos de pulido posterior aun solo proceso de cargado de partículas abrasivas. Entonces en la Fig. 17 muestra las diferencias en el comportamiento de un plato que tuvo un buen desempeño comparado con otro que presenta un mal desempeño y donde $plateuse$ es el número consecutivo de corrida y $laptime$ es el tiempo total de proceso.

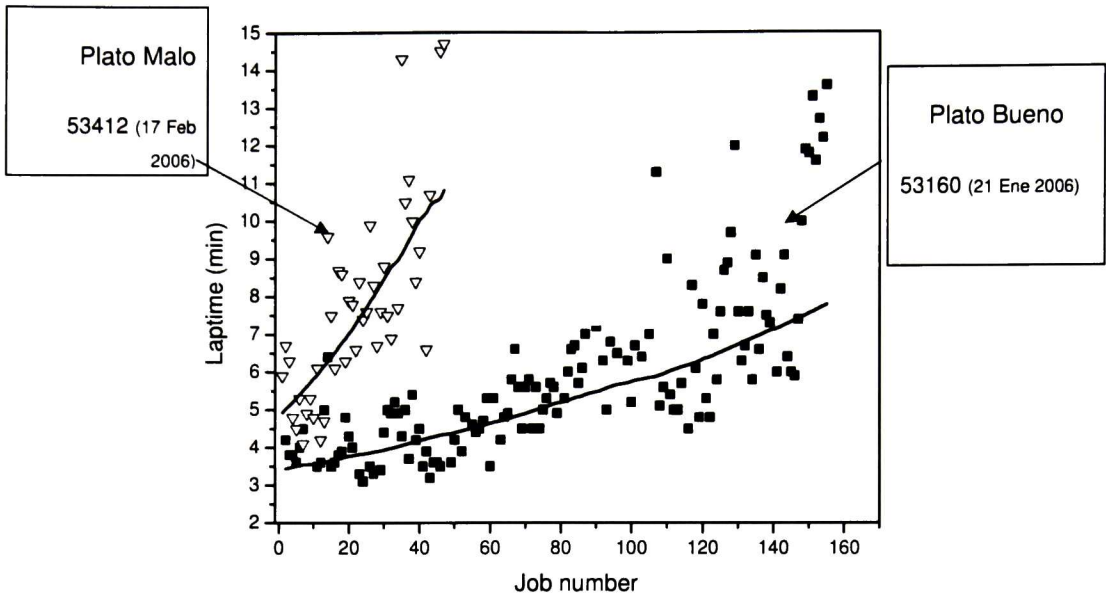


Figura 17. Gráficas representativas del desempeño de platos de pulido: *laptime* vs. *job number* (número consecutivo de proceso)

Este trabajo propone una alternativa de análisis de estas curvas mediante una distribución exponencial de los datos utilizando la función de la forma $Y = A e^{Bx}$. En (5) se presentan los resultados del ajuste de ambos grupos de datos.

$$Laptime = 4.8391e^{0.0187x}$$

$$Laptime = 3.423e^{0.0061x} \tag{5}$$

Por lo tanto, un plato bueno se distingue de uno malo por tener una constante A y B menores.

5.5 Ajuste exponencial de los datos del historial de desempeño experimental

Para el análisis de distribución exponencial se utilizarán los datos del parámetro de desempeño *ph2time* (tiempo de pulido en fase 2, en segundos). En la figura siguiente se muestra una curva representativa del Plato 50919 pulido particularmente el 26 de Julio del

2006 en la celda 13 de pulido en la máquina 793. Los datos que se muestran corresponden a la segunda etapa de pulido, a razón de que, como se explicó anteriormente, se remueve de manera fija 60 nm.

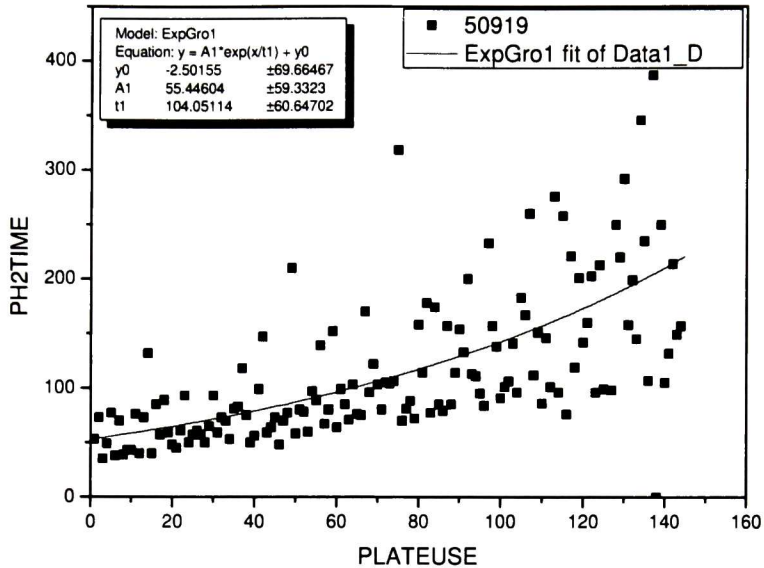


Figura 18. Comportamiento de desempeño de pulido de hileras del plato 50919 en términos de *phase2time* vs *plateuse*

Por su comportamiento, el desempeño de un plato de pulido de la mayoría de los platos puede ser descrito por el ajuste con una función exponencial de estos datos experimentales.

$$y = y_0 + A_0 \exp\left[\frac{x}{t_1}\right] \quad (6)$$

Donde $y = ph2time$, $x = plateuse$, $A_0 = ph2laptime_{initial}$ y t_1 representaría la cantidad de datos utilizados en el ajuste.

De estos resultados se observa que este plato en particular alcanzó a pulir 150 hileras y mostró un $ph2laptime_{initial}$ de 55.4 segundos, que corresponde a un $laprte_{initial}$ de 1.08 nm/s.

También, como se mencionó anteriormente, estos datos se pueden representar en términos del parámetro de desempeño *laprate* (tasa de remoción por segundo) en nm/s. La gráfica y el ajuste exponencial correspondiente se muestran a continuación.

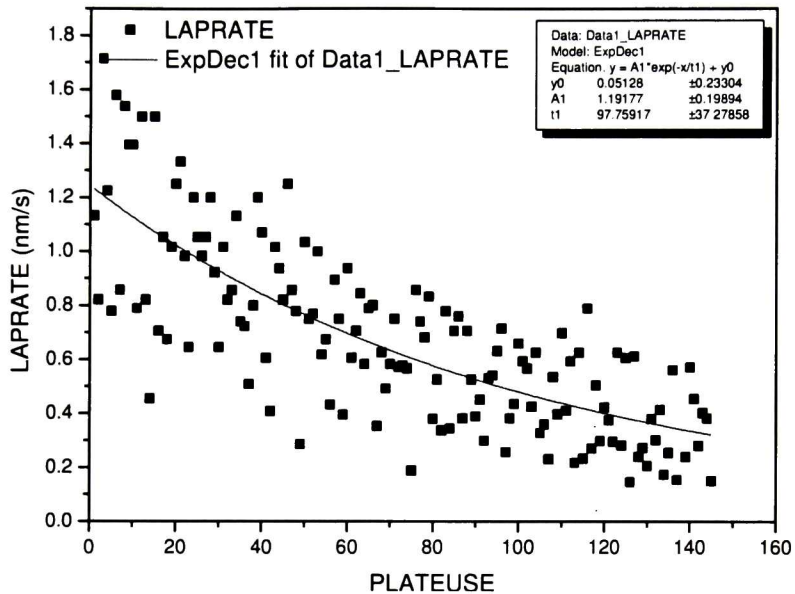


Figura 19. Comportamiento de desempeño de pulido de hileras del plato 50919 en términos de *laprate* vs. *plateuse*

Estos datos se ajustan con una función exponencial decreciente.

$$y = y_0 + A_0 \exp\left[\frac{-x}{t_1}\right] \quad (7)$$

Esta tendencia describe claramente la degradación de la efectividad en la razón de pulido de un plato durante todo su tiempo de vida desde que se preparó antes de regresar al área de soporte.

Este tipo de ajustes del desempeño real de platos por medio de constantes ofrece la posibilidad del uso de programas adaptados al análisis de esos parámetros para la identificación temprana del desempeño de plato de pulido.

5.6 Representación y análisis de los datos de desempeño en “acumulativos”

Otros análisis que se realizan a los datos de desempeño de los platos de pulido se muestran a continuación usando el desempeño *ph2time* y respetando la progresión del *plateuse*. El criterio que se usa es el de “acumulativo negativo”:

$$Y = \frac{n_i - 0.5}{N} \quad (8)$$

Donde N es el número total de datos (máximo de *plateuse* o máximo de hileras por plato), n_i es el valor instantáneo del *plateuse* e Y el término de “survival” en la gráfica.

Este tipo de análisis ofrece posibilidades de analizar el desempeño global del proceso, aunque no permite la definición de parámetros críticos que permitan la identificación temprana de platos con mal desempeño. Es por ello que no se presentan gráficas de este tipo de análisis. Para ello se prefirió el análisis masivo de datos, mismo que se tratara en secciones posteriores.

5.7 Distribución Weibull

Como se ha mencionado al inicio de esta sección, los platos de pulido tienden a tener un desempeño promedio diferente entre sí, en función de sus condiciones de superficie, tasa de planicie y ranura, rugosidad de corto y largo alcance, propiedades físicas y mecánicas del Sn-Sb, etc. El objetivo del análisis masivo de datos de desempeño de platos es encontrar la mejor combinación de parámetros involucrados para alcanzar el mayor desempeño de los mismos. Para esto es necesario identificar primero los platos con buen y platos con mal desempeño sin modificar el proceso actual de fabricación a partir de los resultados de desempeño durante el pulido. El CINVESTAV estableció y demostró el proyecto anterior con Hitachi que la estadística Weibull, originalmente desarrollada para analizar el desempeño mecánico de piezas cerámicas, se aplica con éxito al estudio de desempeño de los platos de Sn-Sb de Hitachi durante el pulido de cabezas magnéticas. [Avi06]

En el caso de materiales cerámicos requeridos mecánicamente, la gran distribución en propiedades mecánicas, característica de materiales frágiles, requiere un análisis estadístico. La función utilizada con mayor frecuencia cuando se trata de datos con altos niveles de dispersión es la distribución Weibull. Esta función estadística se utiliza ampliamente en problemas de ingeniería en relación a la caracterización de promedios de vida de partes o componentes, como rodamientos, chumaceras, componentes electrónicos, análisis de desempeño mecánico de piezas cerámicas, etc. [Men97]

La función de Weibull de dos parámetros es como sigue: [Mon96]

$$f(N) = \frac{m}{N_o} \left(\frac{N}{N_o} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{N}{N_o} \right)^m \right], \quad N > 0 \quad (9)$$

Donde $f(N)$ es la distribución de frecuencias de variable aleatoria N (*número de hilas pulidas*); m es el parámetro de forma, el cual también es conocido como el módulo de Weibull y N_o es el parámetro de escala, llamado también el valor característico. La frecuencia de distribuciones acumulativa (o probabilidad de falla en desempeño de pulido P_F es:

$$F(N) = P_F = 1 - \exp \left[- \left(\frac{N}{N_o} \right)^m \right] \quad (10)$$

Rescribiendo esta ecuación se obtiene

$$\ln \left(\ln \frac{1}{1 - P_F} \right) = m \ln N - m \ln N_o = m(\ln N - \ln N_o) \quad (11)$$

la cual es la ecuación de una línea recta. Finalmente, la probabilidad de supervivencia de un i_{th} elemento se calcula con la ecuación siguiente:

$$P_F = \frac{(i - 0.5)}{n} \quad (12)$$

Donde n es el número de muestras. Para cada condición de procesamiento es necesaria una población de por lo menos 20 muestras para alimentar la función de Weibull con resultados satisfactorios.

Un ejemplo del análisis del desempeño de un plato que se ha comportado como “bueno” respecto a uno “malo” se muestra en la figura siguiente.

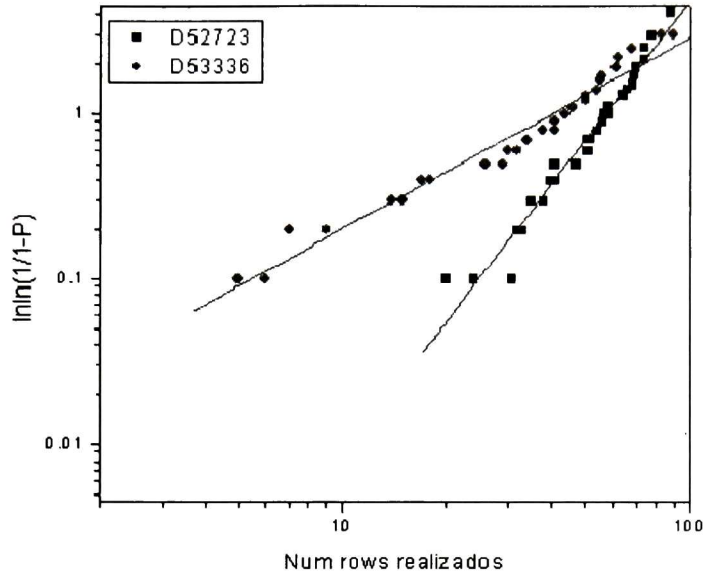


Figura 20. Comparación de distribución de datos Weibull de desempeño en términos de *maxruns* de dos platos de pulido. Cada punto en la gráfica representa el desempeño alcanzado por ciclo de preparación del plato

Combinando los análisis de datos de pulido con estadísticas Weibull con el criterio del tiempo inicial de pulido (*initial laptime*) se puede proponer un criterio de identificación temprana de platos con buen y mal desempeño.

5.8 Criterio alternativo para la identificación de platos buenos y platos malos: Máquinas de pulido como sistemas de monitoreo

A partir de una comparación de los dos parámetros de desempeño más importantes, que son *maxruns* y tiempo de ciclo, se encontró una correlación entre ellos, tal y como se muestra en la figura siguiente. El resultado más importante que se desprende de esta gráfica es que tiempos de ciclo largos (*initial Laptime* mayor a 5.5 min) tendencialmente no producirán platos con un alto número de hileras por plato. Por lo tanto, esta representación

de datos puede servir para la identificación temprana de platos buenos y malos, en donde las máquinas de monitoreo son las mismas máquinas de pulido.

Este criterio es importante porque se presenta la posibilidad de “monitorear” e identificar prácticamente sin ambigüedad el desempeño que tendrá un plato de pulido al momento de llegar a la línea de producción, independientemente de su proceso de preparación. La identificación es posible sin modificar la capacidad instalada en la planta.

Este análisis estuvo basado en una cantidad reducida de platos, comparando su desempeño con el criterio del tiempo inicial de pulido. Un estudio con datos “a gran escala” basado en análisis Weibull se presenta en la sección siguiente.

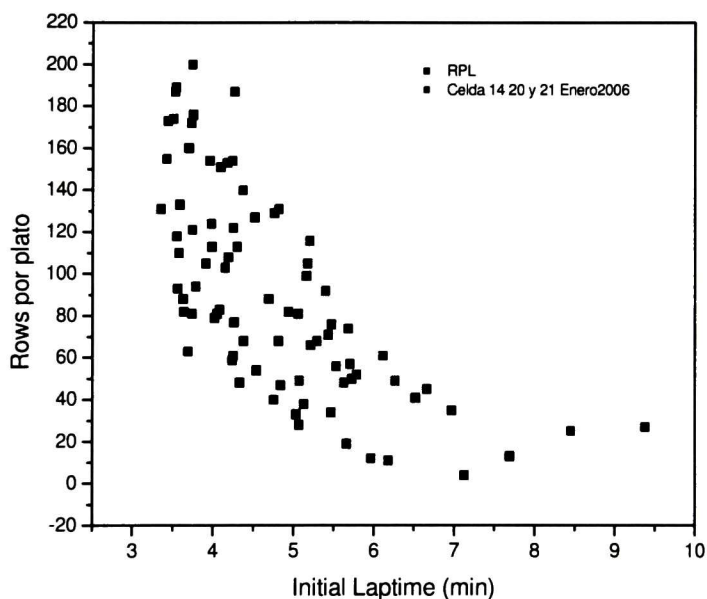


Figura 21. Comparativa de los dos parámetros de desempeño de platos más importantes:
RPP vs. initial laptime

5.9 Análisis estadístico a gran escala mediante distribución Weibull

El análisis estadístico inicia con una base de alrededor de 700000 datos experimentales, que incluyen 60 variables de proceso de pulido final de cabezas magnéticas. Con ese volumen de datos se cubren dos meses de producción del área de pulido fino.

Actualmente se encuentra en producción en la planta de Hitachi Global Storage Technologies en Guadalajara dos grandes tipos de cabezas magnéticas GMR y TMR (Por sus siglas en inglés: *Giant Magnetic Resistance* y *Tunneling Magnetic Resistance*, respectivamente). Como la tecnología TMR es la que continuará en la producción en la planeación de Hitachi GST, los datos de GMR no fueron tomados en cuenta.

5.9.1 Determinación de la unidad de proceso para la identificación de parámetros de desempeño

Una de las características del proceso de pulido es que cualquier máquina de pulido utiliza cualquier plato de pulido. Esta ventaja de flexibilidad de la línea de producción de cabezas magnéticas ocasiona que los datos de desempeño de una máquina de pulido y un plato en particular sean confundidos entre sus diferentes corridas del plato en la máquina. Por esta razón se tomó en cuenta solo el primer uso de cada plato por máquina.

Se definió la variable *plateid* (identificación del plato en una máquina específica) para identificar el uso de un plato con una máquina de pulido, usando:

$$\text{Plateid} = \text{Plate} * 1000 + \text{statnum}$$

Donde *statnum* es el número de máquina de pulido y *plate* es el identificador del plato de pulido.

La cantidad máxima de corridas es de 60 para cada plato, para este trabajo se define como la referencia para un plato de óptimo desempeño, también se define 15 corridas por plato como valor de referencia para un plato de mal desempeño. Se categorizó el número de corridas por plato en grupo de 15, 30, 45 y 60 corridas, y se agregó el parámetro *maxruns* (categoría de número de corridas por *plateid*) de acuerdo con la tabla 7.

Tabla 7. Categoría de número de corridas por plato y su valor para el parámetro *maxruns*

Plateuse	Maxruns
1-15	15
16-30	30
31-45	45
46-60	60

Se identificaron dos platos que presentaron en su historial una cantidad de corridas correspondientes a las categorías de referencia en 15 y 60 corridas por plato. Seleccionando los platos identificados como 50028 y 53266.

5.9.2 Determinación de los parámetros de desempeño de pulido relevantes para definir el desempeño de los platos

Los parámetros de desempeño de pulido tomados para el inicio del análisis fueron los tiempos de cada una de las fases del proceso de pulido, variable de la cual depende la tasa de desgaste, siendo esta última dependiente de la cantidad y la distribución del tamaño de las partículas abrasivas incrustadas en el plato, la velocidad de rotación del plato y la presión ejercida sobre la hilera.

Se buscó la variación del tiempo de pulido en función del número de corrida, como se muestra en la Fig. 22. No fue posible establecer una diferencia estadística para la varianza del tiempo de ciclo en función del número de carga para platos usados entre las categorías de 15 a 60 corridas, como se ha observado en los datos históricos de proceso de pulido.

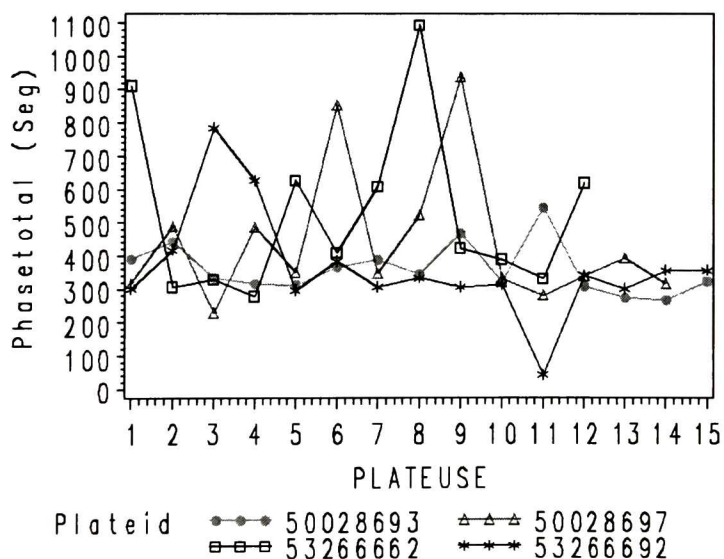


Figura 22. Gráfica comportamiento del parámetro *plateuse* en función del parámetro *phasetime*

El parámetro de desempeño ideal debe ser el de menor posibilidad de variación de cada fase. Como se describe en la tabla 8, cada una de las fases del proceso de pulido tiene posibilidades de variación dependientes de la velocidad de rotación del plato y niveles de presión en la hilera, el parámetro con la menor posibilidad de variación fue *phase1time*, lo cual sugirió ser uno de los primeros parámetros a evaluar:

Tabla 8. Fases de pulido y sus posibilidades de variación

Parámetro de proceso	Velocidad de rotación posible a seleccionar	Niveles de presión posibles a seleccionar	Número de posibilidades de variación
Phase1time	1	2	2
Phase2time	5	4	20
Phase3time	4	3	12
Phase4time	4	6	24

Se analizaron cada uno de los parámetros de desempeño del tiempo para cada una de las fases, combinaciones de ellos, la suma de dos de ellos e incluso la suma de todos ellos. Se seleccionó el parámetro de desempeño *phase1time* ya que presentó menor variación que los parámetros *phase2time*, *phase3time* y *phase4time*.

En la Fig. 23 se presentan las variaciones entre las cuatro unidades de proceso (*plateid*) para cada una de las cuatro fases de pulido. En esas graficas se muestran pueden observar grandes variaciones para: *phase2time*, *phase3time* y *phase4time*. El único parámetro que presenta variaciones uniformes es el *phase1time* (Figura 23a).

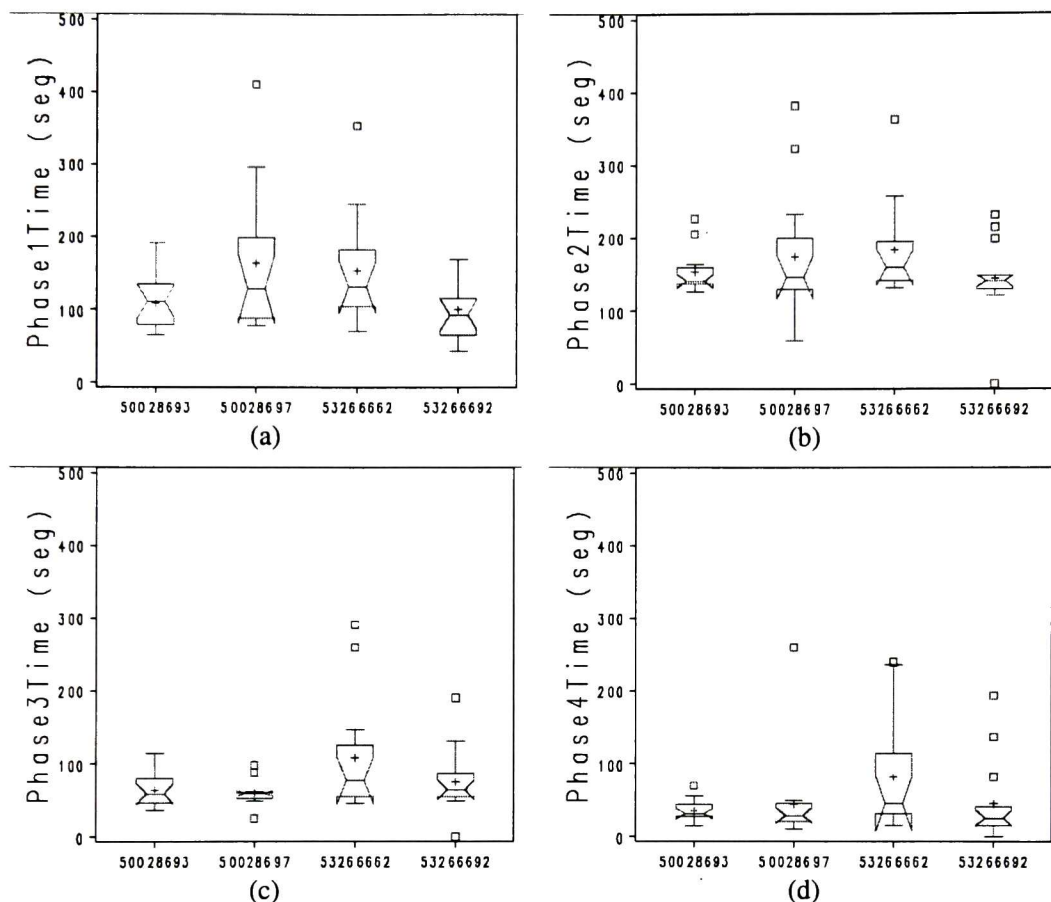


Figura 23. Gráficas de variabilidad de los parámetros de desempeño: (a) *phase1time*, (b) *phase2time*, (c) *phase3time* y (d) *phase4time* en función de la unidad de proceso

5.9.3 Determinación de tipo de población en los parámetros de desempeño

Una evaluación fundamental para un análisis estadístico es la identificación del tipo de distribución de la población a analizar. La distribución normal, también llamada distribución de Gauss o distribución gaussiana, es la distribución de probabilidad que con más frecuencia aparece en estadística y teoría de probabilidades [Mon96]. Por otro lado, como se mencionó anteriormente, la distribución Weibull se utiliza como modelo de tiempo de vida de productos y de propiedades mecánicas de materiales [Wei51]. Por lo tanto se evaluó la distribución de la población para el parámetro de desempeño de cada una de los *plateid*.

Para determinar el tipo de población se utilizó la prueba llamada ajuste de bondad (Goodness-of-fit) [Sas04]. El objetivo de esta prueba es comparar el resultado con el valor: 0.05, cuando el valor resultante es mayor a 0.05 entonces se afirma que la población pertenece a la distribución evaluada, por otro lado, cuando el valor resultante es menor que 0.05 entonces se determina que la población NO pertenece a la distribución en evaluación.

Tabla 9. Evaluación de distribución normal y Weibull del parámetro *phase1time* de cada *plateid*

PlateId	Valor de ajuste a distribución Normal	Valor de ajuste a distribución Weibull
50028693	0.242	0.250
50028697	0.130	0.078
53266662	0.073	0.250
53266692	0.093	0.141

En la tabla 9 se muestran los valores de ajuste de bondad para los *plateid* seleccionados, donde el parámetro a evaluar el ajuste de bondad de la distribución normal y Weibull, donde evaluamos si todos los *plateid* listados son mayores a 0.05, afirmando que tienen distribución tanto normal como Weibull.

5.9.4 Comparación de poblaciones para distribuciones normales

El teorema estadístico del límite central dice que: sea X_1, X_2, \dots, X_n una muestra aleatoria de una distribución con media μ y varianza σ^2 . Entonces, si n es suficientemente grande, la variable aleatoria tiene aproximadamente una distribución normal. Esto nos dice cuando tenemos un número mayor de muestras en una población la desviación estándar disminuye. Así para detectar diferencias entre poblaciones de datos, es necesario tener un número determinado de muestras de cada grupo, con el objetivo que las varianzas de cada grupo no se entrelacen, es decir, en una comparación estadística, a medida que nuestro número de muestras se incrementa, el poder estadístico de la prueba también aumenta.

Para realizar la comparación de medias es necesario que las distribuciones a comparar sean distribuciones normales. Los datos requeridos para la evaluación para un resultado confiable son dependientes de la media aritmética, desviación estándar y la cantidad de muestras [Hin95].

Los resultados de la tabla 10 son el cálculo de las medias aritméticas del parámetro de desempeño *phase1time* de cada *plateid* y la diferencia absoluta entre las medias aritméticas entre los platos correspondientes.

Tabla 10. Media aritmética de cada *plateid* y diferencias entre medias de platos

Plateid	Media	Diferencia Absoluta
50028693	108.80	55.33
50028697	164.14	55.33
53266662	153.66	53.26
53266692	100.40	53.26

Como se observa en la Tabla 10 las diferencias entre las medias de platos se encuentran en el rango de 53 a 55 segundos.

El valor de la desviación estándar de la población para todos los *plateid* del parámetro de desempeño *phase1time* se muestra en la tabla 11.

Tabla 11. Valores estadísticos para la variable *phase1time*

Mediciones Estadísticas Básicas			
Localización		Variabilidad	
Media	130.0000	Desviación Std	70.6100
Mediana	113.5000	Varianza	4986.0000
Moda	65.0000	Rango	368.0000

Como fue definido en la sección 5.9.2 se está buscando que el parámetro de desempeño *phase1time* pueda ser capaz de diferenciar entre platos de 15 y 60 corridas, por lo tanto, el tamaño de muestra ideal debe ser 15. Se evaluaron tamaños de muestras a partir de 15 y hasta 27 unidades, desviación estándar de 70.61 y definiendo el poder de la prueba (o confiabilidad de la prueba) en 0.80, 0.85 y 0.90 para encontrar las medias aritméticas que

sean capaces de distinguir la prueba de comparación de medias. Los resultados de esta evaluación se muestran en la tabla 12.

Tabla 12. Cálculo del poder de la prueba para comparación de medias del parámetro phaseItime

Distribución		Normal	
Método		Exacto	
Alfa		0.1	
Desviación estándar		70.61	
Índice	N por grupo	Poder	Diferencia en medias
1	15	0.800	65.7
2	15	0.850	70.9
3	15	0.900	77.4
4	17	0.800	61.5
5	17	0.850	66.4
6	17	0.900	72.4
7	19	0.800	58.1
8	19	0.850	62.6
9	19	0.900	68.3
10	21	0.800	55.1
11	21	0.850	59.4
12	21	0.900	64.9
13	23	0.800	52.6
14	23	0.850	56.7
15	23	0.900	61.9
16	25	0.800	50.4
17	25	0.850	54.3
18	25	0.900	59.3
19	27	0.800	48.4
20	27	0.850	52.2
21	27	0.900	57.0

Basado en los resultados de la tabla 12 se determinó que usando 15 muestras y un poder de la prueba de 0.85, solo se puede distinguir medias aritméticas entre poblaciones mayores de 71 segundos. Por otro lado, si la diferencia entre las medias aritméticas esta entre 53 y 55 unidades, con un poder de la prueba de 0.85 entonces se requieren al menos 27 muestras.

Para ambos resultados, distinguir medias aritméticas mayores a 71 segundos con 15 muestras o requerir al menos 27 muestras distinguir entre medias de mas de 53 segundos para efectuar la comparación nos deja fuera de los objetivos de esta investigación, por lo tanto, la comparación de medias entre poblaciones no es la ideal.

5.9.5 Comparación de población en base a distribución Weibull

Para la comparación de poblaciones en base a distribución Weibull ser abordó solamente la comparación gráfica ya se solo se encontraron referencias para esa, en donde se define que dos poblaciones son diferentes si al ser evaluadas en un tiempo de vida determinado, las líneas de los intervalos de confianza de cada grupo no se entrelazan o interceptan.

5.9.5.1 Definición del modelo Weibull para el parámetro *phaseItime*

En la sección 5.9.2 se determinó que el parámetro de desempeño *phaseItime* para los platos seleccionados 50028 y 53266 se ajustan a la distribución Weibull, ahora es posible proponer un modelo para el parámetro de desempeño *phaseItime*, donde su probabilidad de vida sea la ideal para un plato.

Estos platos fueron determinados como los de óptimo desempeño, el modelo propuesto será la función Weibull de *phaseItime* de dichos platos. La tabla 13 muestra los datos calculados de los platos identificados como óptimos.

Tabla 13. Valores estimados para los percentiles de la función Weibull del *phaseItime* de los platos óptimos

		Asintótica Normal			
		Limites al 90% de confianza			
Percentil	Estimado	Error estándar	Inferior	Superior	Maxruns
0.1	13.0003836	4.26849662	7.57545843	22.3101976	60

0.2	16.2100607	4.83778093	9.92182468	26.4836434	60
0.5	21.7059798	5.62357099	14.1744379	33.2393823	60
1	27.0823445	6.21399204	18.5686283	39.4995995	60
2	33.817779	6.76268061	24.338477	46.9890609	60
5	45.4848549	7.33712315	34.8847397	59.3059327	60
10	57.1889479	7.56871738	46.0013702	71.0973554	60
20	72.6080471	7.53544099	61.2135652	86.123533	60
30	84.2905952	7.37508802	72.9921732	97.3378942	60
40	94.4938639	7.22236378	83.3305555	107.152656	60
50	104.128445	7.13172533	93.0344324	116.545378	60
60	113.795809	7.15375644	102.616857	126.192582	60
70	124.121867	7.36317575	112.582651	136.8438	60
80	136.128138	7.90651627	123.724979	149.774687	60
90	152.55502	9.20450082	138.14199	168.471833	60
95	165.87538	10.6870658	149.196121	184.419283	60
99	190.189183	14.1797665	168.238966	215.003256	60
99.9	216.372179	18.7851656	187.578198	249.586148	60

En base a los parámetros Weibull: escala y forma que se muestran en la tabla 14 se puede definir el modelo para el plato óptimo como (13).

$$F(y) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{y}{117}\right)^{3.14}\right], y > 0 \quad \text{Para cualquier tiempo } y \text{ positivo} \quad (13)$$

Tabla 14. Parámetros estimados para la función Weibull para los platos óptimos

Parámetro	Estimado	Error estándar	Asintótica Normal Límites al 90% de confianza		Grupo
			Inferior	Superior	
Escala Weibull	117.0048	7.1957	105.7478	129.4601	60
Forma Weibull	3.1436	0.4334	2.5058	3.9438	60

5.9.5.2 Prueba de confiabilidad dependiente del número de muestras

Para determinar la diferencia capaz de distinguir con un tamaño de muestra de 15 unidades utilizando la comparación de distribución Weibull se evalúa la siguiente ecuación [Abe04]:

$$R(t_0) = \exp \left[\frac{\ln(1-C)}{n \left(\frac{T}{t_0} \right)^\beta} \right] \quad (14)$$

donde:

$R(t_0)$ = Confiabilidad en el tiempo t_0 =

n = Tamaño de muestra

T = Tiempo total de cada parte

β = Parámetro Weibull shape o slope

C = Nivel de confianza (En porcentaje)

$n = 15$

$T, T_0 = 216$

$\beta = 2.01$

$C = 90\%$

$$R(t_0) = \exp \left[\frac{\ln(1-.90)}{15 \left(\frac{216}{216} \right)^{3.14}} \right] = \exp \left[\frac{-2.3025}{15} \right] = 0.8576$$

Por lo tanto con 15 muestras se puede diferenciar entre poblaciones que cumplan al 100% y 85% respectivamente con el tiempo de vida propuesto de 216 segundos.

5.10 Evaluación de la distribución Weibull con los datos en gran volumen

El modelo de vida del plato de pulido propuesto a 216 segundos para las primeras 15 corridas en base al parámetro de desempeño *phase1time* se evaluó para cada uno de los cuatro *plateid* seleccionados.

5.10.1 Evaluación del parámetro *phase1time* para dos platos

Se estimaron los porcentajes de la función Weibull para cada *plateid* para un tiempo de vida de 216 segundos, obteniendo los valores mostrados en la tabla 15.

Tabla 15. Estimados de la función de distribución Weibull de cada *plateid* para un tiempo de vida de 216 segundos (Límites al 90% de confianza)

X	Pr(<X)	Inferior	Superior	Pr(>X)	Inferior	Superior	Plateid
216.00	0.7342	0.5721	0.8735	0.2658	0.1265	0.4279	50028693
216.00	0.9992	0.9771	1.0000	0.0008	0.0000	0.0229	50028697
216.00	0.7921	0.6234	0.9200	0.2079	0.0800	0.3766	53266662
216.00	0.9988	0.9722	1.0000	0.0012	0.0000	0.0278	53266692

En la Fig. 24 se muestran los resultados del plato 1, donde los círculos y líneas en rojo representan a un plato de 15 corridas y los triángulos y las líneas verdes corresponden a un plato de 60 corridas. Tomando el punto de cruce en el tiempo de vida propuesto del *plateid* 50028693 podemos apreciar que tiene un 73.42% de probabilidad de llegar al funcionamiento de 216 segundos, y la línea roja superior correspondiente al intervalo superior de confianza, tiene un 87.35%. Así basados en que el *plateid* 50028693 se determinó que solo podría llegar en un punto máximo de 87.35% del funcionamiento esperado de 216 segundos.

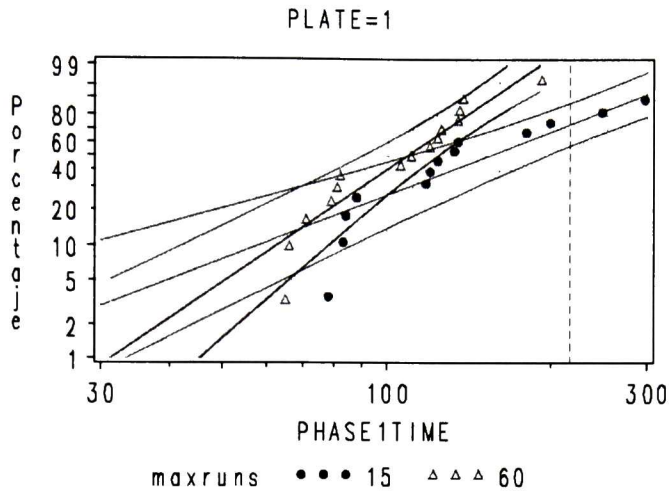


Figura 24. Comparación de distribución Weibull para el parámetro *phase1time* entre un *plateid* de 15 corridas y un *plateid* de 60 corridas para el plato 1

En la Fig. 25 se muestra el plato 2 donde los círculos y líneas en rojo representan a un plato de 15 corridas y los triángulos y líneas verdes corresponden a un plato de 60 corridas. Tomando el punto de cruce del *plateid* 53266662 podemos apreciar que tiene un 79.21% de probabilidad de llegar al funcionamiento de 216 segundos, la línea roja superior correspondiente al intervalo superior de confianza con un 92%. Basados en que el *plateid* 53266662 se determinó que sólo podría llegar hasta un 92% del funcionamiento esperado de 216 segundos.

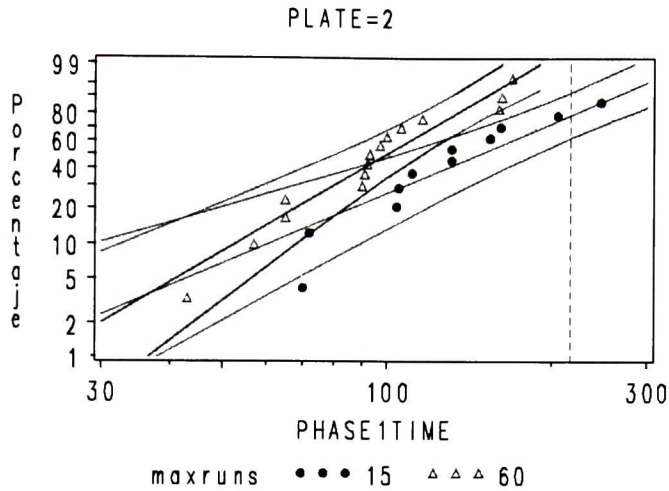


Figura 25. Comparación de distribución Weibull para el parámetro *phase1time* entre un *plateid* de 15 corridas y un *plateid* de 60 corridas para el plato 2

5.10.4 Evaluación del modelo de vida para el parámetro *phase1time* en alto volumen

Al encontrar el modelo para dos platos óptimos es puede inferir que todos los demás platos se comporten de manera similar, basados en los resultados de homogeneidad en composición química y considerando nula la influencia en las condiciones de la suspensión de partículas abrasivas que se incrustan al plato de pulido, así como su distribución en el mismo plato. Para la evaluación de esta hipótesis en cuanto a la varianza de datos se evaluó el modelo para todos los platos registrados, es decir, para los dos meses de producción.

5.10.1.1 Evaluación del parámetro *phase1time* para todos los platos

El modelo de vida del plato de pulido propuesto a 216 segundos para las primeras 15 corridas en base al parámetro de proceso *phase1time* se evaluó para todos los platos que se encuentran en producción en la planta de Hitachi.

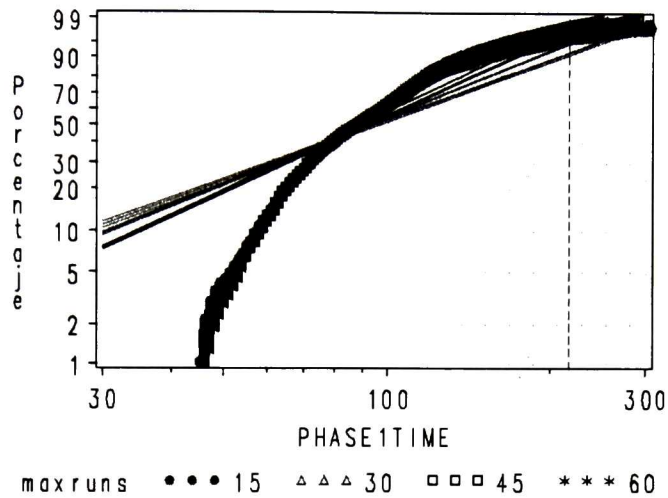
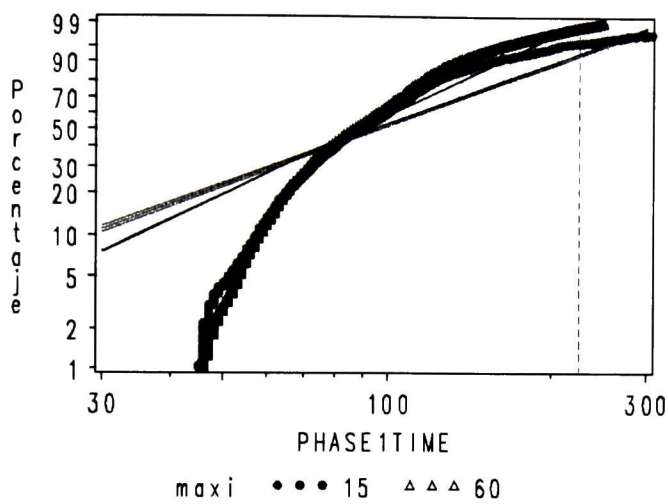
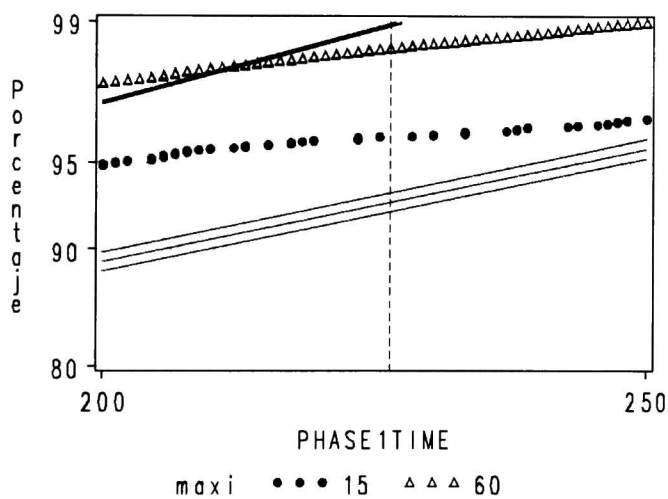


Figura 26. Comparación de distribución Weibull para el parámetro *phase1time* para las categorías de plato 15, 30, 45 y 60 corridas

En la Fig. 26 se muestran las líneas de los intervalos de confianza para cada una de las categorías de platos 15, 30, 45 y 60, donde se resalta que ninguna de ellas se entrelazan en el tiempo de vida propuesto (línea punteada de referencia) de 216 segundos.



(a)



(b)

Figura 27. (a) Comparación de distribución Weibull para el parámetro *phase1time* para las categorías de plato 15 y 60 (b) Acercamiento a la zona del 99.9% de probabilidades

La Fig. 27 muestra el estimado de la función Weibull para un tiempo de 216 segundos para el parámetro de desempeño *phase1time*. En esa grafica se puede apreciar que los intervalos de confianza no se interceptan entre los diferentes *maxruns*: 15 y 60.

En la tabla 16 se muestra en detalle el estimado para la función Weibull a un tiempo de vida de 216 segundos para cada una de las categorías de *maxruns*. Donde la importancia radica en la afirmación o negación de la igualdad de las poblaciones al evaluar el estimado inferior de cada *maxruns* (o grupo) con el estimado superior otro grupo. Por ejemplo el

valor estimado inferior del grupo *maxruns* de 60 corridas es de 0.9847 que es mayor al estimado superior del grupo de 45 corridas: 0.9769, por lo tanto, se puede afirmar que las poblaciones son estadísticamente diferentes.

Tabla 16. Estimados de la función de distribución Weibull de cada *maxruns* para un tiempo de vida de 216 segundos (Límites al 90% de confianza)

X	Pr(<X)	Inferior	Superior	Pr(>X)	Inferior	Superior	Maxruns
216.00	0.9144	0.9081	0.9205	0.0856	0.0795	0.0919	15
216.00	0.9508	0.9483	0.9532	0.0492	0.0468	0.0517	30
216.00	0.9754	0.9739	0.9769	0.0246	0.0231	0.0261	45
216.00	0.9851	0.9847	0.9854	0.0149	0.0146	0.0153	60

5.10.2 Vida útil de los platos de pulido

El registro histórico de la vida útil de los platos de pulido muestra que aproximadamente el 58% de ellos llega a alcanzar el fin de vida útil de 60 corridas y el restante 42% fueron retirados antes de su vida útil. Las cantidades correspondientes a los porcentajes de platos retirados antes de la vida útil del plato se muestran en detalle la tabla 17.

Tabla 17. Relación de platos retirados antes de la vida útil

			Frecuencia	Porcentaje
Maxruns	Frecuencia	Porcentaje	Acumulada	Acumulado
Retirados antes de vida útil	4384	42.37	4384	42.37
Retirados al fin de vida útil	5962	57.63	10346	100.00

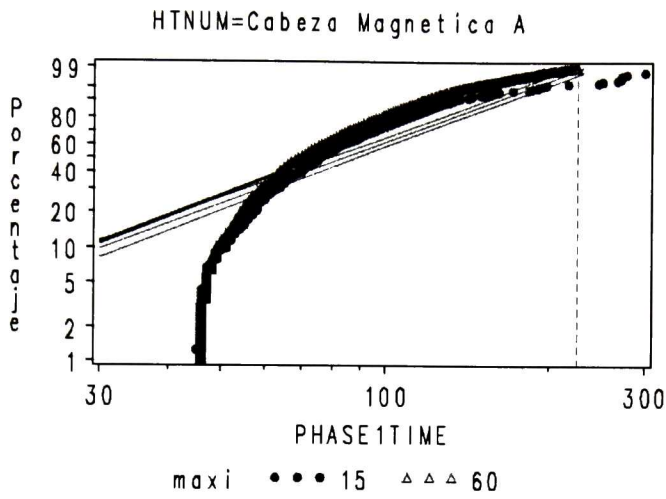
En la tabla 18 se muestra el porcentaje de platos retirados de acuerdo con el esquema propuesto en la sección 5.9.1, donde las categorías de cantidad de corridas por plato fueron de 15, 30 45 y 60. El porcentaje en la tabla nos indica que solo el 76% de los platos llegaron al fin de su vida útil (o cantidad de corridas para un plato óptimo), de esta manera, nos proporciona el 24% restante de la población para el análisis de las probables causas de bajo desempeño.

Tabla 18. Relación de platos retirados del proceso de pulido en grupos de 15, 30, 45 y 60 corridas por plato

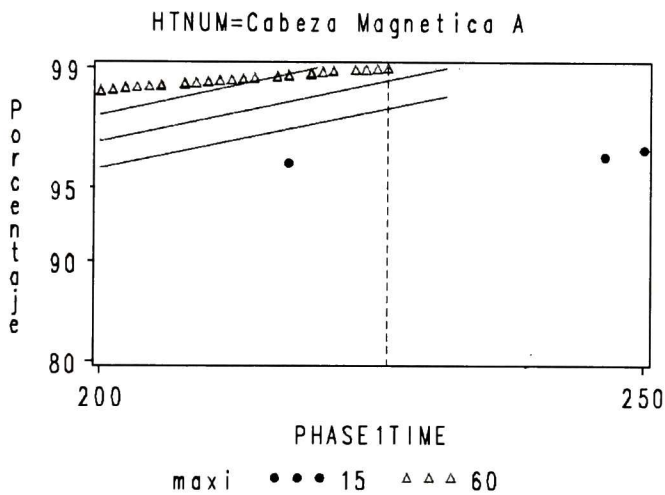
			Frecuencia	Porcentaje
Maxruns	Frecuencia	Porcentaje	Acumulada	Acumulado
15	815	7.88	815	7.88
30	783	7.57	1598	15.45
45	877	8.48	2475	23.92
60	7871	76.08	10346	100.00

5.10.3 Evaluación del modelo de vida para el parámetro $phase1time$ en alto volumen de datos por tipo de cabeza magnética

El modelo de vida del plato de pulido propuesto a 216 segundos para las primeras 15 corridas en base al parámetro de desempeño $phase1time$ se evaluó para cada uno de los tipos de cabeza magnética que se encuentran en producción en la planta de Hitachi.



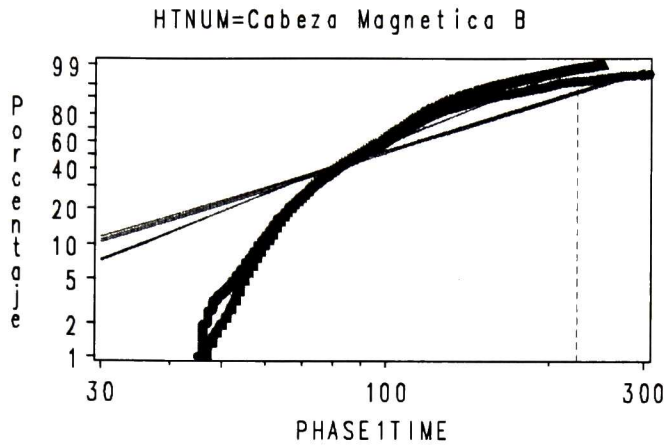
(a)



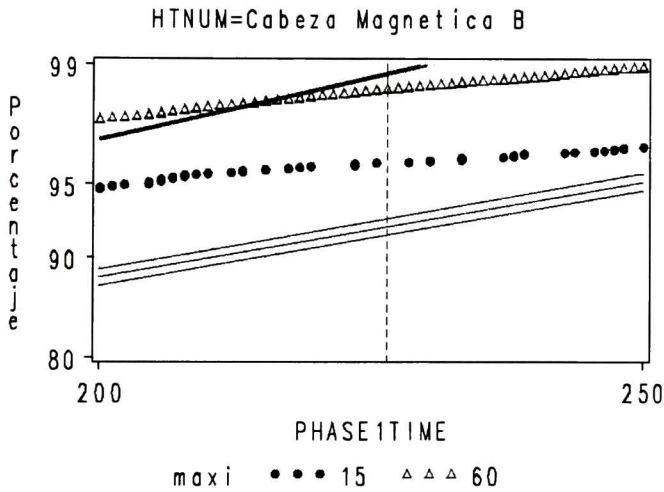
(b)

Figura 28. (a) Gráfica de la función de distribución del parámetro *phase1time*. (a) Tipo de cabeza magnética A. (b) Acercamiento para el tipo de cabeza magnética A

La evaluación del modelo para el tipo de cabeza magnética A se muestra en la Fig. 28 (a) y (b), donde se observa la gráfica de la función de distribución del parámetro de desempeño *phase1time* y la categoría de 60 corridas tiene su punto de cruce con la línea de vida de 216 segundos en 99.78% y la categoría de 15 corridas en 98.77%. La diferencia entre las estimación de vida prácticamente desaparece al reducirse al 1% y requiriendo un incremento significativo en cantidad de muestras, en comparación del estimado de todos los platos entre las mismas categorías (Sección 5.10.1) con una diferencia de 6%. Además que la probabilidad de vida para la categoría de 15 corridas es muy cercana al 100%.



(a)



(b)

Figura 29. Gráfica de la función de distribución del parámetro *phase1time*. (a) Tipo de cabeza magnética B. (b) Acercamiento para el tipo de cabeza magnética B

Para el tipo de cabeza magnética B se muestra en la Fig. 29 (a) y (b) se gráfica de la función de distribución del parámetro de desempeño *phase1time* donde la categoría de 60 corridas tiene su punto de cruce con la línea de vida de 216 segundos en 98.84% y la categoría de 15 corridas en 92.36%. La diferencia entre el estimado de vida es de 6.5%, que es mayor que la diferencia encontrada del estimado de todos los platos entre las mismas categorías. Estos porcentajes mencionados aparecen en la columna X de la tabla 19

se muestra el estimado de vida de 216 segundos para los tipos de cabezas magnéticas A y B en las categorías de 15 y 60 corridas.

Tabla 19. Estimados de la función de distribución Weibull de los tipos de cabezas magnéticas A y B para las categorías 15 y 60 corridas para un tiempo de vida de 216 segundos (Límites al 90% de confianza)

X	Pr(<X)	Inferior	Superior	Pr(>X)	Inferior	Superior	Grupo	HT
216.00	0.9877	0.9813	0.9923	0.0123	0.0077	0.0187	15	A
216.00	0.9978	0.9975	0.9980	0.0022	0.0020	0.0025	60	A
216.00	0.9236	0.9177	0.9293	0.0764	0.0707	0.0823	15	B
216.00	0.9884	0.9881	0.9887	0.0116	0.0113	0.0119	60	B

Capítulo 6. Conclusiones y perspectivas

6.1 Conclusiones

- ✓ Se encontraron variaciones considerables en las propiedades físicas de los platos analizados, especialmente en la dureza, las cuales pudieran ser la fuente de variación en el funcionamiento entre platos. También se puede observar que el proceso de producción de la aleación del plato se basa en el rolado, proceso que provee alta resistencia a la deformación y por lo tanto endurecimiento al material.
- ✓ El análisis químico de absorción atómica muestra que la composición de las dos muestras de platos tienen muy poca variación entre sí, y que se encuentran dentro de las especificaciones.
- ✓ Se encontró que el tamaño y la distribución del tamaño de partículas abrasivas está dentro de las especificaciones determinadas por Hitachi Global Storage Technologies.
- ✓ Los platos pueden ser clasificados en platos de desempeño “bueno” y “malo”, dependientes del número máximo de corridas de cada ciclo en el proceso de pulido mediante el uso de las mismas máquinas de pulido y el ajuste de los datos con una función exponencial en donde los parámetros de ajuste A y B describen adecuadamente el desempeño del plato.
- ✓ Se determinó un modelo Weibull para describir un plato óptimo en base a las primeras corridas del plato, dependiente del parámetro de desempeño phase1time (13), mismo que puede predecir de manera temprana el desempeño de corridas por plato.
- ✓ La estimación de la probabilidad de las categorías de 15 y 60 corridas muestra una diferencia de 6%. Aplicando las mismas condiciones de estimación para los tipos de cabezas magnéticas A y B se calculan diferencias de probabilidad del 1% y 6.5% respectivamente, lo cual sugiere que el modelo de tiempo de vida de 216 segundos en

el adecuado para la evaluación del tiempo de vida para el tipo de cabeza magnética B y pero no para el tipo de cabeza magnética A.

- ✓ Se evaluó el modelo para datos a gran volumen para cada una de las categorías en que fue dividida la cantidad de corridas por plato, encontrando el modelo capaz de comparar estadísticamente cada categoría.

6.2 Perspectivas

La investigación realizada en esta tesis nos permite la predicción del número de corridas de un plato en la máquina de pulido, es decir, la identificación temprana del desempeño de platos. Sin embargo no soluciona el problema de bajo desempeño de un gran volumen de los platos que se encuentran en la línea de producción. Los trabajos propuestos en este capítulo están encaminados a desarrollar técnicas que permitan la identificación de las fuentes de variación.

- ✓ Se demostró que es posible definir el desempeño del plato como “bueno” y “malo” dependientes del número máximo de corridas en cada ciclo del proceso de pulido, por lo tanto, se puede generar un procedimiento que registre cada plato al ingreso a la planta de manufactura con el lote de producción de la aleación para así correlacionarlo con los resultados de su desempeño en pulido, con el objetivo de buscar un criterio de aceptación o rechazo de lotes de platos de pulido basado en desempeño, ya que en la actualidad no se cuenta con ello.
- ✓ Se determinó un modelo Weibull capaz de diferenciar el desempeño de corridas entre los platos de pulido, por lo que se sugiere implementar el algoritmo del estimado de la función de distribución Weibull a un tiempo de vida 216 segundos para el parámetro *phasetime* al final de la corrida 15 para el tipo de cabeza magnética B. con la finalidad de predecir el rendimiento del plato y al fin de vida del plato evaluar la precisión del algoritmo. Dichos parámetros de predicción de vida de plato y precisión del algoritmo se pueden agregar a los parámetros del proceso que son registrados en la base de datos. Si la precisión del algoritmo es buena, se podría correlacionar el proceso de preparación de platos (maquinaria y/o procesos) con el desempeño del plato e incluso generar alertas para detener el proceso, maquinas o lote de diamante que fueran causa de bajo desempeño.
- ✓ Durante el proceso de estimar de la función de distribución Weibull a 216 segundos para el tipo de cabeza magnética A se encontró una diferencia del solo el 1% entre las categorías de 15 y 60 corridas por lo cual seria necesario incrementar el numero de

muestras o la evaluación de un tiempo de vida diferente. Esto nos dice que los tiempos de vida pudieran ser distintos para cada tipo de cabeza magnética. Así para el tipo de cabeza magnética A y las que se manufacturen en el futuro requerirán de la evaluación de un tiempo de vida diferente (calculado del modelo), para facilitar esta tarea se presentan en el apéndice los programas de SAS utilizados en para el presente trabajo.

- ✓ Se encontraron diferencias en las propiedades físicas del plato de pulido, específicamente en los valores de dureza, por lo tanto, se sugiere la implementación de un durómetro capaz de medir *in-situ* la superficie de los platos de pulido sobre áreas no usadas para el proceso de pulido, la información de la dureza pudiera correlacionarse con el desempeño de pulido de los platos, esto podría ser una línea de investigación para futuros trabajos en Hitachi Global Storage Technologies.

Capítulo 7. Apéndices

7.1 Programas de SAS

Análisis estadístico a gran escala

```
data srkrow;
format pid 12.0;
set tesis.srkrow;
keep pid HNUM PROCESSDATE PROCESSTS
      STATNUM EMPLOYEE EMP PLATE PLATEUSE
      NEST NESTUSE FIXTURE FIXTUREUSE
      TAPEUSE MODULEUSE CABLEUSE PROCESS
      PHASE1TIME PHASE2TIME PHASE3TIME PHASE4TIME
      phasetotal STORETS SMEARINDEX;
pid =
plate*1000+statnum;
phasetotal =
PHASE1TIME +PHASE2TIME+ PHASE3TIME+ PHASE4TIME;
where htnum in (142,143,146,147)
      and plateuse between 1 and 60;
run;
```

Determinación de tipo de distribución de los datos

```
proc sort data=juntos2;
by plate pid maxruns;
run;

proc univariate data=juntos2;
var phaselttime;
histogram /
midpoints=0 to 180 by 5
normal (l=1 color=red)
Weibull (l=2 color=blue)

vaxis = 0 to 30 by 5;
axis1 label=(a=90 r=0)
order=(0 to 30 by 5);

title;
where phaselttime between 30 and 5000
      and plateuse<16 and maxruns>11;

by plate pid maxruns;
format maxruns maxruns. ;

run;
```

Estadística descriptiva

```
proc univariate data=juntos2;
```



```

var phasetime;
where phasetime between 30 and 5000
      and plateuse<16 and maxruns>11;
format maxruns maxruns. ;
run;

```

Cálculo del poder de la prueba para comparación de medias

```

proc power;
  twosamplemeans test=diff
    meandiff=.
    stdev=70.61
    npergroup = 15 17 19 21 23 25 27
    power=0.8 0.85 0.9
    alpha=0.1;
run;

```

Evaluación del parámetro *phasetime* bajo distribución Weibull para dos platos

```

proc reliability data = juntos2;
distribution Weibull;
probplot phasetime=maxruns /
  overlay survtime = 216 href=216
  plower=1 pupper=99
  llower=30 lupper=300
  conf=0.90;

where phasetime <5000
      and plateuse<16
      and phasetime>30
      and (maxruns between 10
            and 15 or maxruns between 46 and 60);
by plate ;

symbol1 value=dot color=red ;
symbol2 value=dot color=green;
symbol3 value=dot color=black;
symbol4 value=dot color=gray;
symbol5 value=dot color=blue;
title;* 'Distribucion Weibull de phasetime';
title2;* 'agrupados por maxruns';

format maxruns maxruns.
      htnum htnum.
      plate plate.;
run;

```

Evaluación del parámetro *phasetime* para todos platos en distribución Weibull

```

proc reliability data = juntos2;
distribution Weibull;
probplot phasetime=maxruns /
  overlay survtime = 216 href=216
  plower=1 pupper=99
  llower=30 lupper=300
  conf=0.90;

```

```

where phasetime <5000
      and plateuse<16
      and phasetime>30
      and (maxruns between 10
           and 15 or maxruns between 46 and 60);

symbol1 value=dot color=red ;
symbol2 value=dot color=green;
symbol3 value=dot color=black;
symbol4 value=dot color=gray;
symbol5 value=dot color=blue;
title;* 'Distribucion Weibull de phasetime';
title2;* 'agrupados por maxruns';

format maxruns maxruns.
       htnum htnum.
       plate plate.;
run;

```

Ingreso de datos y correlación entre los parámetros densidad de carga y máximo de corridas

```

data modelo;
input densidad corridas;
label      densidad='Densidad de carga'
          corridas='Maximo de corridas'
;
datalines;
1.14  3
2.38  14
4.93  58
4.75  82
9.20  258
;

proc reg data=modelo;
model corridas=densidad;
plot corridas*densidad;
run;
quit;

```

7.2 Referencias

- [Abe04] Abernethy Robert B “*The New Weibull Handbook*” Paul Barringer, pp 9-12 (2004)
- [Asm90] ASM International “*Metals Handbook*” ASM International, Vol.2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials (1990)
- [Avi06] Avila C, Herrera A, Mayen R, Saldaña J, Ramírez R, Yáñez J “Identificación y caracterización de platos de pulido con buen y mal desempeño”, CINVESTAV-Querétaro, pp 11-18 (2006)
- [Cai97] Cai G, Lu Y, Zheng H “*Análisis on Lapping and Polishing Pressure Distribution*” Northeastern University, China (1997)
- [Cha99] Harry Chandler “Hardness Testing” ASM International, pp 21 (1999)
- [Chu94] Church Mark A, Desouches Alain M, Krebs Richard E “*Ultimate inductive head integrated lapping system*” (United States Patent: US5361547) (1994)
- [Die86] Dieter George E “*Mechanical Metallurgy*” McGraw-Hill Series in Materials Science and Engineering, pp326-327 (1986)
- [Fuj06] Fujii Ryuji, Hosaka Koji, Li Guowei, Hong Xiaoming, Xiao Xiangbin “*Fixture for slider lapping, lapping device and lapping method*” (United States Patent: US7153198) (2006)
- [Fin97] Fine Metals “*Tin / Antimony Plates*” Fine Metals Ashland, VA, USA, pp1-9 (1997)
- [Ger84] German Randall M “*Powder metallurgy science*” Metal Powder Industry, pp 28-35 (1984)
- [Hin95] Hines W, Montgomery D “Probabilidad y estadística para ingeniería y administración”, CECSA, pp 237-241 (1995)

- [Hit04] Hitachi Global Storage Technologies "*RP07 - Tin-Antimony Plate 8mm 14" (XIFP / SRK)*" Hitachi Global Storage Technologies Guadalajara, Documento confidencial SPEC RP06, pp 5 (2004)
- [Hit05] Hitachi Global Storage Technologies "*Q0001 – 0.17 um diamond lapping slurry (400 ml)*" Hitachi Global Storage Technologies Guadalajara, Documento confidencial SPEC Q0001, pp 6 (2005)
- [Kam02] Kametz D A, "*Precision Fabrication and Development of Charging and Testing Methods of Fixed-Abrasive Lapping Plates*", North Carolina State University, pp 2 (2002)
- [Mar04] Marinescu I, Rowe W, Dimitrov B, Inasaki I "Tribology of abrasive machining processes", Willian Andrew publishing, pp 1-6 (2004)
- [Men97] Mendenhall William "*Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*" Prentice Hall, pp 241-244 (1997)
- [Mon96] Montgomery D, Runger G "Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería", McGraw-Hill, pp 173, 210-216 (1996)
- [Nel03] Nelson B "*Applied life data analysis*" Wiley Series in Probability and Statistics, pp 36-37 (2003)
- [Que07] Quezada J M "Resistance profile for Femto" Hitachi Global Storage Technologies Guadalajara, Documento confidencial , pp 13 (2007)
- [Sas04] SAS Institute "SAS/QC 9.1 User's Guide" STATS Publishing Inc, pp 196-197 (2004)
- [Ser05] Sermon Carl F, Banitt Terry F, Hagen John P, Johnson Roger W, Moorefield George M, Weller Thomas D "*Lapping plate topography system*" (United States Patent: US6882956) (2005)

[Ter05] Terrell E, Gromala D, Beal D, "*Understanding Liquid Particle Counters*"
Particle Measuring Systems, Inc. pp 11-15 (2005)

[Wei51] Weibull Wallodi "*A Statistical Distribution Function of Wide Applicability*"
ASME Journal of Applied Mechanics, pp 293-297 (1951)

EL JURADO DESIGNADO POR LA UNIDAD QUERÉTARO DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, APROBÓ LA TESIS DE MAESTRÍA DEL C. CARLOS MANUEL HERNÁNDEZ RUIZ TITULADA: “CARACTERIZACIÓN DE PLATOS DE SN-SB CARGADOS CON DIAMANTE Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE SU DESEMPEÑO EN EL PROCESO DE PULIDO FINAL EN LA MANUFACTURA DE CABEZAS MAGNÉTICAS PARA DISCOS DUROS.”, FIRMAN AL CALCE DE COMÚN ACUERDO LOS INTEGRANTES DE DICHO JURADO, EN LA CIUDAD DE QUERÉTARO, QRO., A CATORCE DE JULIO DE DOS MIL OCHO.

DR. RAFAEL RAMÍREZ BON

DR. JUAN MUÑOZ SALDAÑA

DR. JOSE MARTIN YÁÑEZ LIMÓN

DR. FRANCISCO JAVIER ESPINOZA BELTRÁN



CINVESTAV
BIBLIOTECA CENTRAL



SSIT000006897